

Département de géographie et télédétection
Faculté des lettres et sciences humaines
Université de Sherbrooke

**Identification et cartographie des zones de reboisement à l'aide des données
TM de Landsat et ROS de RADARSAT dans la vallée centrale de
Cochabamba, Bolivie.**

Monique Desrosiers, 1967-

I-1670

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître ès Sciences (M.Sc.) en géographie,
cheminement Télédétection

Mai 1999

© Monique Desrosiers, 1999

BIBLIOTHEQUE U.S.

Directeur de recherche: Q. Hugh J. Gwyn

Membres du jury:

Ferdinand Bonn (Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke)

Wilma Crespo (Faculté d'agronomie, *Universidad* Mayor de San Simón)

Résumé

Desrosiers, Monique (1999), Identification et cartographie des zones de reboisement à l'aide des données TM de Landsat et ROS de RADARSAT dans la vallée centrale de Cochabamba, Bolivie. Mémoire de Maîtrise, Département de géographie et télédétection, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, 66 p.

Dans le contexte du développement économique et social de la Bolivie, la sylviculture est beaucoup pratiquée dans la zone andine du Département de Cochabamba. Cette région est dominée par une grande diversité d'espèces forestières natives et cultivées. La gestion de la diversité forestière de la Bolivie est faite à l'aide d'une méthodologie traditionnelle possédant une mise à jour trop lente des données due à un manque de documents cartographiques. L'intégration de la télédétection par une combinaison des données Landsat et RADARSAT dans le processus de cartographie des ressources forestières, permettra de faire des scénarios d'aménagement, de développement et d'impacts environnementaux. L'objectif principal du projet est d'identifier les espèces forestières des sites de reboisement afin de faire un suivi de l'état de développement des plantations et de créer un document cartographique forestier à partir de la télédétection. L'utilisation des méthodes de classification à l'aide d'indices de végétation d'une image TM, de classification par analyse de textures d'une image F2 de RADARSAT et de classification par combinaisons des canaux des deux capteurs nous amènent au développement d'une méthodologie répétitive valable pour effectuer la surveillance et la gestion des plantations reboisées. Premièrement, différencier la végétation des sites de reboisement des autres classes des images dont les résultats varient entre 66 % et 99 % selon la méthode de classification utilisée. Pour différencier l'espèce feuillu des espèces de conifères les résultats varient entre 10 % et 76 % et pour différencier les essences entre elles, les résultats varient entre 11 % et 57 %. Les sites de reboisement sur les cartes thématiques résultantes sont détectés et classés dans la bonne classe mais il est impossible de délimiter le périmètre d'un site de reboisement de son environnement. Les résultats des classifications dirigées ont, en général, des taux d'exactitude plus élevés que ceux des classifications non-dirigées surtout pour le test des composantes principales de l'image TM. Les meilleurs résultats pour l'image TM sont la classification dirigée selon l'analyse en composantes principales à l'aide des 6 canaux de départ pour le test de la végétation, la classification non-dirigée des composantes principales à l'aide du test des 6 canaux de base et de l'indice de végétation NDVI pour les deux ensembles d'arbres et la classification dirigée à l'aide des 6 canaux de base pour distinguer les trois espèces entre elles. Les meilleurs résultats pour l'image de RADARSAT sont la classification dirigée à l'aide de la texture homogénéité pour les tests de la végétation et des feuillus/conifères et la classification dirigée à l'aide de la texture entropie pour les essences. Pour la combinaison des canaux des deux images, le meilleur résultat pour le test de la végétation est la combinaison des deux premières composantes principales des 6 canaux de base de l'image TM et l'image ROS avec la texture homogénéité.

Abstract

Forestry plays an important role in the economic and social development in the Andean region of the Department of Cochabamba, Bolivia. The region possess a large diversity of indigenous and cultivated forest species. The integration of remote sensing with the combination of TM data from Landsat and SAR data from RADARSAT in the management process and the mapping of forestry resources will assist in the development of management scenarios and the evaluation of environmental impact of infrastructure projects. The objective of this study is to identify species in reforested areas and to evaluate the development state of the plantations and finally to assist in preparing the forestry map. We have used classification methods based on the vegetation indices of a Landsat image and the textural measures of RADARSAT image (F2). The combination of these images provides us with a valid monitoring methodology for the forestry plantations. Several evolutionary tests of the classification were made. Firstly, differentiation of the reforested vegetation types from the other classes gave accuracy results between 66 % and 99 %. Differentiation of deciduous from conifers gave results between 10 % and 76 % and differentiation between different species gave accuracies between 11 % and 57 %. Plantation sites are accurately classified but it was not possible to concisely determine their perimeter. This was especially true for recently planted plantations. In general the supervised classifications gave better results especially when principal component results derived from Landsat data were used. The best result using the RADARSAT data were obtained from supervised classification of the radiometric data, and from the homogeneity textural parameter to distinguish between the indigenous vegetation and the deciduous/coniferous forest types and the radiometric data combined with the entropy textural parameter to map species types.

Table des matières

Table des matières	i
Liste des figures	ii
Liste des tableaux	iii
Liste des annexes	v
Remerciements	vi
Dédicace	vii
1. Identification des besoins	1
1.1. Problématique	1
1.2. Objectifs	2
1.3. Hypothèses	3
2. Méthodologie	4
2.1. Description de la zone d'étude	4
2.2. Acquisition des données	9
2.3. Traitement numérique des images	11
2.3.1. Image TM de Landsat	11
2.3.2. Image ROS de RADARSAT	24
2.3.3. Combinaison des images TM et ROS	31
3. Explications des résultats	35
3.1. Analyse des résultats	35
3.1.1 Tests pour distinguer les sites de reboisement	35
3.1.2 Tests pour distinguer les feuillus et les conifères	37
3.1.3 Tests pour distinguer les espèces	38
3.2. Discussions	40
3.2.1. Vérification des objectifs	40
3.2.2. Vérification des hypothèses	41
3.2.3. Observations	42
4. Conclusions	47
5. Références	48

Liste des figures

1. Organigramme méthodologique	5
2. Organigramme détaillé de la méthodologie	6
3. Amérique du sud	7
4. Bolivie et ses départements politiques	7
5. Département de Cochabamba, Bolivie : zone d'étude	8
6. Étapes de la méthodologie concernant l'image TM de Landsat	12
7. Étapes de la méthodologie concernant l'image ROS de RADARSAT	25
8. Variation du coefficient de variation selon la taille de la fenêtre et de l'espèce forestière considérée pour le paramètre contraste	26
9. Étapes de la méthodologie concernant la combinaison des images TM de Landsat et ROS de RADARSAT	32
10. Plantation de <i>Pinus radiata</i> , Bolivie	37
11. Plantation avec une classification faible (arrière plan) et plantation avec une classification forte (avant plan)	42
12. Plantation avec une classification moyenne	43

Liste des tableaux

1. Bandes spectrales nominales du capteur TM de Landsat	10
2. Caractéristiques des capteurs TM de Landsat et ROS en mode F2 de RADARSAT	10
3. Paramètres d'étalonnage du capteur TM de Landsat et valeurs calculées de $L_{\max}(\lambda)$	13
4. Paramètres de l'éclairement solaire hors atmosphère pour le capteur TM de Landsat	14
5. Indices de végétation choisis pour le projet	15
6. Nombre de pixels par classe pour l'ensemble des sites d'entraînement pour la sous-image TM de Landsat	16
7. Exactitude des tests de classification non-dirigée pour distinguer les sites de reboisement sur l'image TM de Landsat	19
8. Exactitude des tests de classification non-dirigée pour distinguer les feuillus et les conifères sur les sites de reboisement sur l'image TM de Landsat	19
9. Exactitude des tests de classification non-dirigée pour distinguer les espèces d'arbres sur les sites de reboisement sur l'image TM de Landsat	19
10. Exactitude des tests de classification dirigée pour distinguer les sites de reboisement sur l'image TM de Landsat	20
11. Exactitude des tests de classification dirigée pour distinguer les feuillus et les conifères sur les sites de reboisement sur l'image TM de Landsat	20
12. Exactitude des tests de classification dirigée pour distinguer les espèces d'arbres sur les sites de reboisement sur l'image TM de Landsat	20
13. Exactitude des tests de classification non-dirigée selon l'analyse en composantes principales pour distinguer les sites de reboisement sur l'image TM de Landsat . . .	21
14. Exactitude des tests de classification non-dirigée selon l'analyse en composantes principales pour distinguer les feuillus et les conifères sur les sites de reboisement sur l'image TM de Landsat	22
15. Exactitude des tests de classification non-dirigée selon l'analyse en composantes principales pour distinguer les espèces d'arbres sur les sites de reboisement sur l'image TM de Landsat	22
16. Exactitude des tests de classification dirigée selon l'analyse en composantes principales pour distinguer les sites de reboisement sur l'image TM de Landsat . . .	23
17. Exactitude des tests de classification dirigée selon l'analyse en composantes principales pour distinguer les feuillus et les conifères sur les sites de reboisement sur l'image TM de Landsat	23

18. Exactitude des tests de classification dirigée selon l'analyse en composantes principales pour distinguer les espèces d'arbres sur les sites de reboisement sur l'image TM de Landsat	24
19. Nombre de pixels par classe pour l'ensemble des sites d'entraînement pour la sous-image ROS de RADARSAT	27
20. Exactitude des tests de classification non-dirigée pour distinguer les sites de reboisement sur l'image ROS de RADARSAT	28
21. Exactitude des tests de classification non-dirigée pour distinguer les feuillus et les conifères sur les sites de reboisement sur l'image ROS de RADARSAT	28
22. Exactitude des tests de classification non-dirigée pour distinguer les espèces d'arbres sur les sites de reboisement sur l'image ROS de RADARSAT	29
23. Exactitude des tests de classification dirigée pour distinguer les sites de reboisement sur l'image ROS de RADARSAT	29
24. Exactitude des tests de classification dirigée pour distinguer les feuillus et les conifères sur les sites de reboisement sur l'image ROS de RADARSAT	30
25. Exactitude des tests de classification dirigée pour distinguer les espèces d'arbres sur les sites de reboisement sur l'image ROS de RADARSAT	30
26. Combinaisons des images TM de Landsat et ROS de RADARSAT	31
27. Exactitude des tests de classification dirigée pour distinguer les sites de reboisement à l'aide de la combinaison des images TM de Landsat et ROS de RADARSAT	33
28. Exactitude des tests de classification dirigée pour distinguer les feuillus et les conifères sur les sites de reboisement à l'aide de la combinaison des images TM de Landsat et ROS de RADARSAT	33
29. Exactitude des tests de classification dirigée pour distinguer les espèces d'arbres sur les sites de reboisement à l'aide de la combinaison des images TM de Landsat et ROS de RADARSAT	34
30. Récapitulation des meilleurs tests de classification pour distinguer les sites de reboisement à l'aide des différents capteurs	36
31. Récapitulation des meilleurs tests de classification pour distinguer les feuillus et les conifères sur les sites de reboisement à l'aide des différents capteurs	38
32. Récapitulation des meilleurs tests de classification pour distinguer les espèces d'arbres sur les sites de reboisement à l'aide des différents capteurs	39

Liste des annexes

1. Images résultantes des meilleurs tests de classification 50

Remerciements

Grâce au soutien, à l'aide et aux nombreux encouragements de mes proches, j'ai réussi à mener à terme ce projet. Il m'est donc important de ne pas laisser sous silence ma reconnaissance et remercier chacun et chacune qui a pu collaborer de loin ou de proche avec moi à ce travail.

Je tiens d'abord à remercier mon directeur de recherche, Q. Hugh J. Gwyn, pour sa confiance témoignée tout au long de la réalisation de ce projet ainsi que son appui scientifique, moral et financier. Mes remerciements vont aussi aux professeurs du Département de Géographie et télédétection de l'Université de Sherbrooke. Je remercie particulièrement monsieur Paul-André Chassé pour son aide technique, sa patience et sa bonne humeur qu'il a partagé au laboratoire de traitement d'images.

Je remercie les collègues en Bolivie du CISTEL (Centro de Investigaciones y Servicios en Teledetección) et ceux du PROFOR (Proyecto Forestal) qui m'ont fourni les outils pour la réalisation de mon travail. Je remercie Dr. Raúl Rico G. et Lic. Wilma Crespo pour leur accueil.

Je n'oublie pas de remercier tous ceux qui m'ont témoigné de l'amitié et tout particulièrement Karol Ratté, Georgina Zoro et Marco Miller.

Enfin, je tiens à remercier l'Association des Universités et Collèges du Canada pour m'avoir accordé une bourse. Cette aide financière m'a permis de réaliser deux séjours en Bolivie pour la réalisation de ce projet. Je remercie également le CARTEL (Centre d'applications et de recherches en télédétection) de m'avoir accordé une bourse.

À Gil,
À mes parents,
Et à toute ma famille
Pour leur amour et leur confiance en moi.

1. Identification des besoins

Le projet de recherche a été pensé afin de tirer profit des avantages qu'offre la télédétection en complémentarité avec les méthodologies traditionnelles de gestion des ressources naturelles et d'aménagement du couvert forestier dans les Andes de la Bolivie. Cette recherche appliquée répond à un problème existant et essaie de fournir une solution.

Ce projet s'inscrit dans le plan national de la Bolivie pour diriger le développement économique et social du pays. Il est parrainé en étroite collaboration par deux organismes universitaires, le Centre d'applications et de recherches en télédétection (CARTEL) de l'Université de Sherbrooke et le *Centro de Investigación y Servicio en Teledetección* (CISTEL) de la Faculté d'agronomie de l'*Universidad Mayor de San Simón* à Cochabamba en Bolivie et de l'organisme bolivien, le *Proyecto Forestal* (PROFOR) qui contribue à la réalisation par son appui logistique et ses connaissances spécifiques dans le secteur forestier.

1.1. Problématique

Pour orienter le développement économique et social de la Bolivie, le gouvernement a adopté la politique du développement durable des ressources naturelles. Le but de cette politique est d'améliorer les conditions de vie de la population actuelle sans mettre en péril les besoins fondamentaux des générations futures.

C'est pourquoi, depuis plus de vingt ans, la sylviculture est beaucoup pratiquée dans la zone andine du Département de Cochabamba. Cette région possède une grande diversité d'espèces forestières natives et cultivées qui est une ressource naturelle renouvelable de grande valeur. Les ressources naturelles sont la base principale du développement de la Bolivie. Il faut planifier les impacts environnementaux dus à une exploitation maximale à long terme. L'équilibre de cet environnement peut être menacé par des aménagements non contrôlés et la destruction des forêts peut avoir des conséquences catastrophiques à plusieurs points de vue.

Par exemple, la pauvreté du peuple s'accompagne de migrations économiques qui se traduisent par le dépeuplement de certaines zones et par l'utilisation intensive d'autres territoires ce qui engendrent un déséquilibre de la répartition démographique et un déséquilibre environnemental. Les produits provenant de la forêt sont très nombreux pour la population. Le bois sert non

seulement au chauffage et à la cuisson mais aussi à la fabrication d'outils agricoles, de bateaux pour la pêche et de meubles.

La gestion efficace de cette ressource est difficile. Les causes sont nombreuses mais elles découlent toutes principalement du manque d'informations et de communications des données sur le territoire. Il existe une méthodologie de suivi dans le secteur de la sylviculture mais elle ne répond pas exactement aux besoins toujours grandissants. L'absence de coordination entre les intervenants de différents secteurs, le manque de mécanismes de transmission des données, la lenteur dans les systèmes d'informations, la pauvreté du réseau routier pour l'accessibilité aux plantations et la grande dénivellation topographique du lieu des plantations compliquent les opérations de classifications et de gestion des données.

La méthodologie actuelle entraîne un retard dans la mise à jour des données de classification et des données de l'état des plantations. La raison majeure est le manque de documents cartographiques du couvert forestier.

L'intégration de la télédétection dans le processus de gestion et de cartographie des ressources forestières de la région permettra de faire des scénarios d'aménagement, de développement et d'impacts environnementaux. De plus, la combinaison des capteurs TM (*Thematic Mapper*) de Landsat et ROS (radar à ouverture synthétique) de RADARSAT semble être appropriée pour le suivi de l'évolution forestière (Leckie, 1990; Holmes *and* Woodward, 1994).

Landsat présente comme avantages la répétition de son passage au-dessus d'une même région (16 jours) et la disponibilité de sept bandes spectrales (Lanciault *et al.*, 1994). Pour ce qui est du capteur RADARSAT, il offre aussi l'avantage de la répétition de son passage (24 jours) et de plus, le radar permet la cartographie des régions montagneuses avec une acquisition relativement indépendante des conditions météorologiques et des conditions d'éclairage (Thompson *et al.*, 1993).

1.2. Objectifs

L'objectif principal du projet de recherche est d'identifier les différentes espèces forestières des sites de reboisement afin de créer un document cartographique forestier à l'aide de la télédétection.

Trois objectifs spécifiques ont été formulés :

- évaluer la méthode de classification par analyse de texture d'une image ROS de RADARSAT (Anys et He, 1995);
- évaluer et comparer la combinaison des méthodes des images du visible et du radar pour un climat semi-aride;
- développer une méthodologie répétitive permettant d'effectuer la reconnaissance des espèces forestières reboisées.

1.3. Hypothèses

Pour ce projet, trois hypothèses ont été formulées :

- il est possible d'identifier et de cartographier les différentes espèces forestières reboisées de la région de Cochabamba à l'aide de la télédétection;
- la classification à l'aide de la combinaison de canaux de chacune des images (TM et ROS) donne des résultats plus performants que les classifications selon les deux méthodes des images prises individuellement;
- il est possible de développer une méthodologie répétitive à l'aide de critères permettant d'effectuer la reconnaissance des espèces forestières reboisées.

2. Méthodologie

Dans un premier temps, une revue de la littérature scientifique a été effectuée sur les thèmes de la Bolivie, de la foresterie, du radar et du Landsat. Cette étape a permis de mieux documenter et orienter les travaux. Un diagramme méthodologique (figure 1) a été élaboré pour la réalisation globale du projet. On présente à la figure 2 les détails de la partie centrale de la figure 1 pour mieux comprendre les différentes étapes du cheminement méthodologique selon les deux capteurs.

2.1. Description de la zone d'étude

La Bolivie est située au centre ouest du continent sud-américain (figure 3) entre $69^{\circ}38'$ et $57^{\circ}26'$ de longitude ouest et entre $22^{\circ}53'$ et $9^{\circ}38'$ de latitude sud. Le pays compte neuf départements administratifs (figure 4) dont Cochabamba (figure 5) qui a une superficie de 55 631 km². La capitale du département porte le même nom.

Ayant déjà en disponibilité une image TM de Landsat de mai 1990, une zone d'étude a été délimitée à l'intérieur de ces limites afin d'obtenir une bonne diversité végétale représentative pour le projet. De plus, la zone d'étude s'est précisée avec la première visite sur le terrain, l'obtention des cartes topographiques et les informations fournies par la base de données des plantations de reboisement nommée *Programa de Repoblamiento Forestal* du PROFOR.

Le site d'étude (figure 5) est couvert par une carte topographique à l'échelle de 1 : 50 000 (Colomi : 6441-IV). Ce secteur comprend le plus grand nombre de plantations homogènes de reboisement. Le secteur est compris entre $66^{\circ}00'$ et $65^{\circ}45'$ de longitude ouest et entre $17^{\circ}20'$ et $17^{\circ}30'$ de latitude sud. La zone d'étude se situe dans la vallée inter-andine du département de Cochabamba, à une altitude comprise entre 2 500 m et 4 100 m au-dessus du niveau moyen de la mer.

La zone d'étude où le relief est très accidenté offre deux paysages distincts. Le premier secteur est plus ou moins sec avec une moyenne de précipitation annuelle de 300 mm à 700 mm et une altitude variant entre 2 500 m et 4 000 m. Le deuxième secteur est tropical avec une moyenne de précipitation annuelle de 1 500 mm à 2 000 mm et une situation topographique variant entre 2 500 m et 3 500 m d'altitude. Ce secteur est plus varié en espèces forestières.

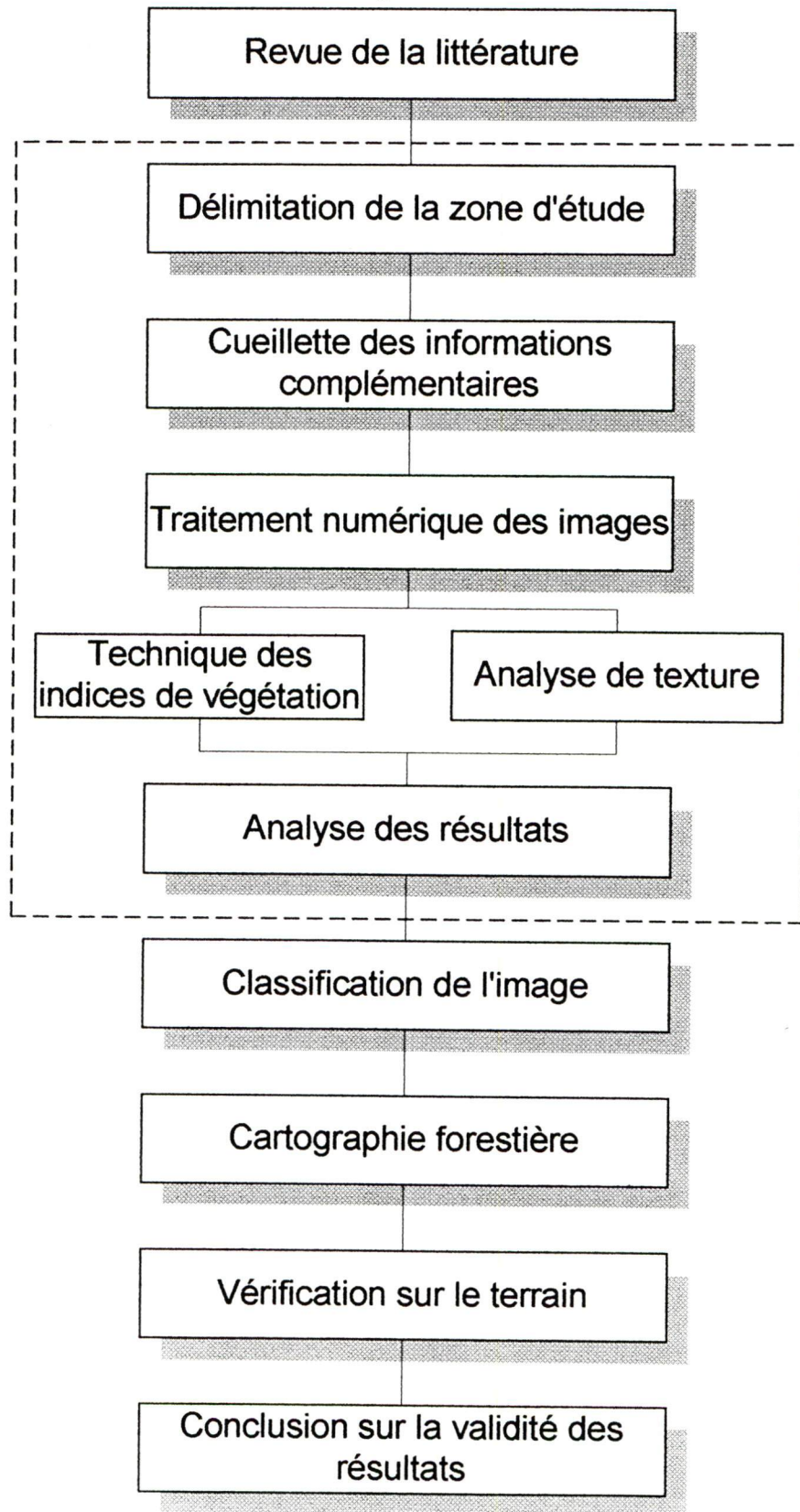


Figure 1 - Organigramme méthodologique (le cadre est détaillé à la figure 2)

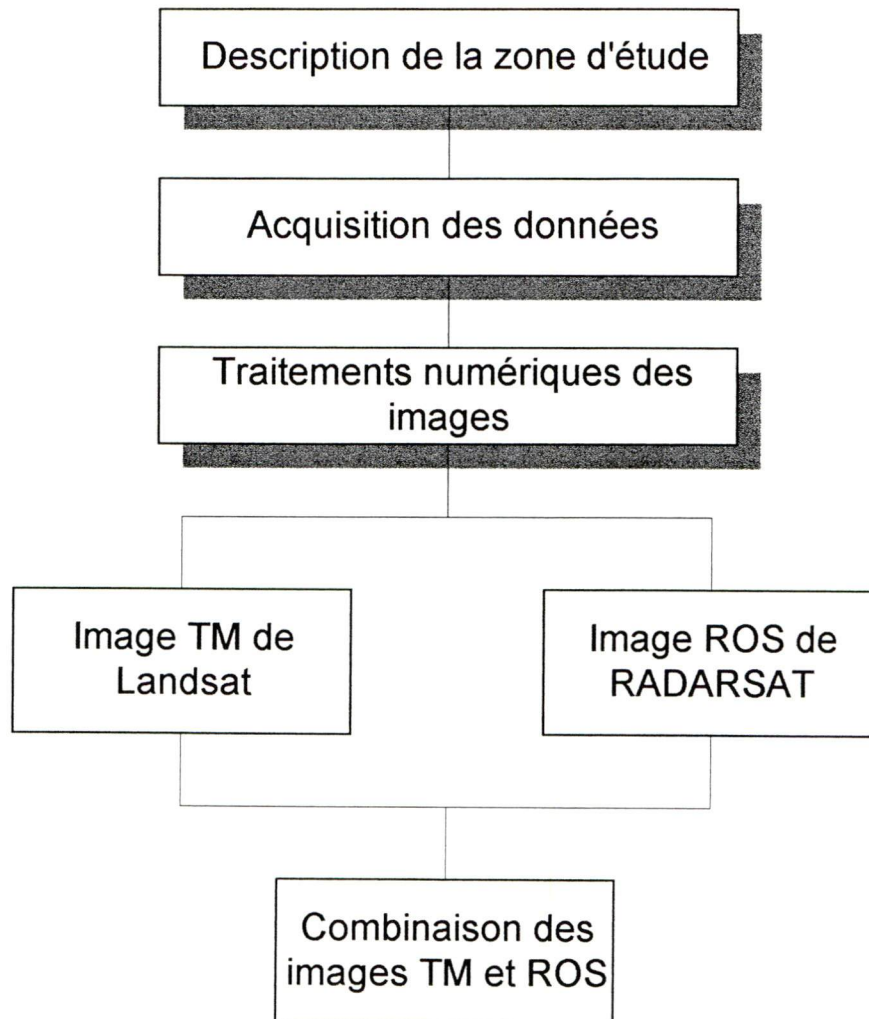


Figure 2 - Organigramme détaillé de la méthodologie

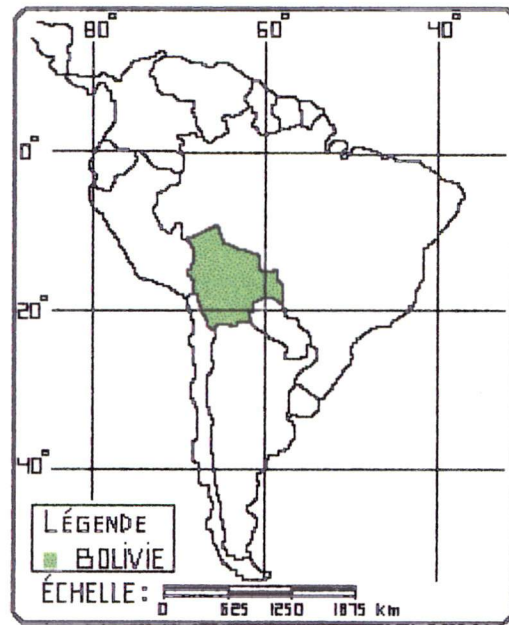


Figure 3 - Amérique du sud

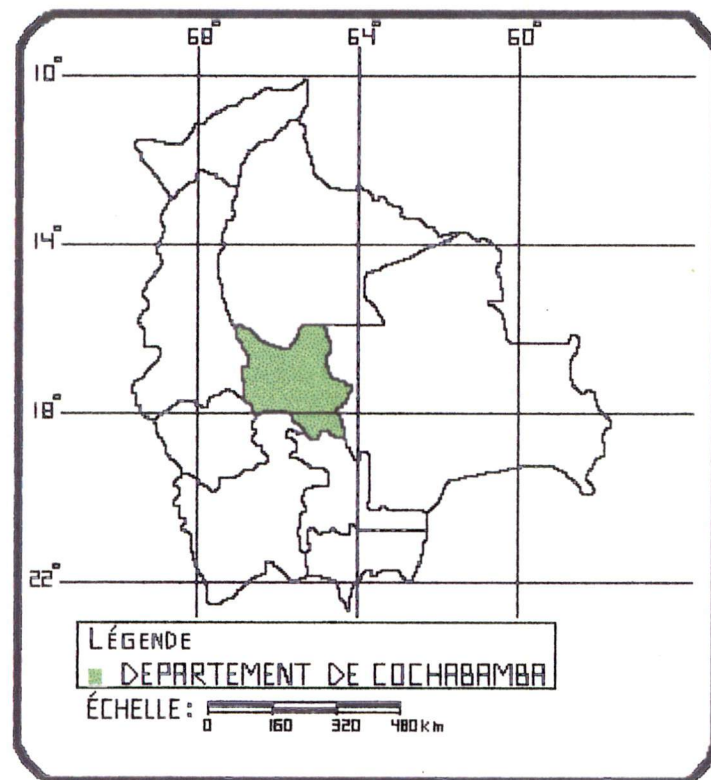


Figure 4 - Bolivie et ses départements politiques

Figure 5 - Département de Cochabamba, Bolivie: zone d'étude

2.2. Acquisition des données

Pour chaque plantation visitée, une coordonnée géographique et une altitude ont été prises par un *Magellan GPS 2 000*. La précision de l'instrument est d'environ 50 m à 100 m en planimétrie et d'environ 100 m à 200 m en élévation. De plus, quelques notes sur les plantations visitées ont été prises dans le but de compléter et de vérifier la base de données des plantations de reboisement *Programa de Repoblamiento Forestal* fournie par le PROFOR. À noter que plusieurs plantations n'ont pu être visitées étant donné leur éloignement et leur accès difficile par véhicule.

La base de données quantitative du PROFOR procure des informations concernant les plantations de reboisement. Elle débute en 1984 et les informations de 1984 à 1992 sont :

- le nom de la communauté;
- le nom du propriétaire;
- l'année de la plantation;
- le numéro de la carte au 1 : 50 000 où se trouve la plantation;
- une estimation des coordonnées géographiques et de l'altitude de l'endroit;
- les espèces contenues sur cette plantation avec le pourcentage de chacune d'elles; et
- la superficie estimée de la plantation.

À partir de 1993, la base de données est complétée par les informations suivantes :

- la date de la plantation (jour/mois/année);
- la pente;
- la profondeur du sol;
- la texture du sol;
- le pH;
- l'exposition; et
- l'érosion.

Les documents cartographiques obtenus sont les cartes topographiques à l'échelle de 1 : 50 000 de la région. Aucun autre document cartographique sur l'utilisation du sol ou des forêts natives n'existent ou n'étaient disponibles.

L'image TM a été prise le 24 mai 1990 à 10h00 (heure locale estimée) avec une résolution spatiale de 30 m. Les 7 bandes spectrales sont disponibles (tableau 1). Les caractéristiques du capteur sont mentionnées dans le tableau 2.

Tableau 1 - Bandes spectrales nominales du capteur TM de Landsat

Bande	Réponse spectrale	Longueur d'onde (μm)
TM1	bleu - vert	0,45 - 0,52
TM2	vert	0,52 - 0,60
TM3	rouge	0,63 - 0,69
TM4	proche infrarouge	0,76 - 0,90
TM5	moyen infrarouge	1,55 - 1,75
TM6	infrarouge thermique	10,5 - 12,5
TM7	moyen infrarouge	2,08 - 2,35

Inspiré de Centre canadien de télédétection (1998)

L'image ROS de RADARSAT en mode Fine 2 (F2) (tableau 2) date du 21 mai 1996 avec un espacement de pixel de 3,125 m, de polarisation HH (Horizontale - Horizontale) avec la bande C où la longueur d'onde est de 5,6 cm.

Tableau 2 - Caractéristiques des capteurs TM de Landsat et ROS en mode F2 de RADARSAT

Caractéristiques	TM de Landsat	ROS en mode F2 de RADARSAT
Altitude du capteur	705,3 km	798 km
Inclinaison	98,2 ⁰	98,6 ⁰
Orbite	Quasi polaire, synchronisée avec le soleil	Circulaire, synchronisée avec le soleil
Cycle de l'orbite	16 jours	24 jours
Angle d'incidence	45 ⁰	39,3 ⁰ - 42,1 ⁰

Inspiré de Landsat Program (1997); RADARSAT International (1996)

2.3. Traitement numérique des images

Le traitement numérique des images a été exécuté à l'aide du logiciel EASI/PACE de PCI. La section suivante est divisée en trois parties: les traitements de l'image TM, les traitements de l'image ROS et ceux de la combinaison des images TM et ROS.

2.3.1. Image TM de Landsat

Un organigramme des étapes de la méthodologie concernant l'image TM de Landsat a été élaboré (figure 6).

A) Corrections géométriques

Les corrections géométriques ont été effectuées à l'aide de la carte topographique au 1 : 50 000. La projection cartographique est UTM (*Universal Transverse Mercator*) et la zone du découpage cartographique est 20K. L'ellipsoïde de référence est *International 1924*.

La correction géométrique a été réalisée à l'aide de 36 points de contrôle répartis proportionnellement sur l'ensemble de l'image. L'erreur moyenne quadratique est de 3,8 pixels calculée selon un polynôme de premier degré.

La méthode de rééchantillonnage du plus proche voisin a été préférée aux autres car elle ne modifie pas la radiométrie originale de l'image (Richards, 1986). Les valeurs radiométriques sont d'une grande importance pour les étapes suivantes.

B) Corrections radiométriques

Par cette étape, les niveaux de gris (8 bits) seront transformés en luminances apparentes au capteur selon la formule suivante (Bannari, 1996, p. 78):

$$L^*(\lambda) = DN(\lambda) \text{ Gain}(\lambda) + \text{Offset}(\lambda) \quad (1)$$

où L^* est la luminance apparente ($\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$).

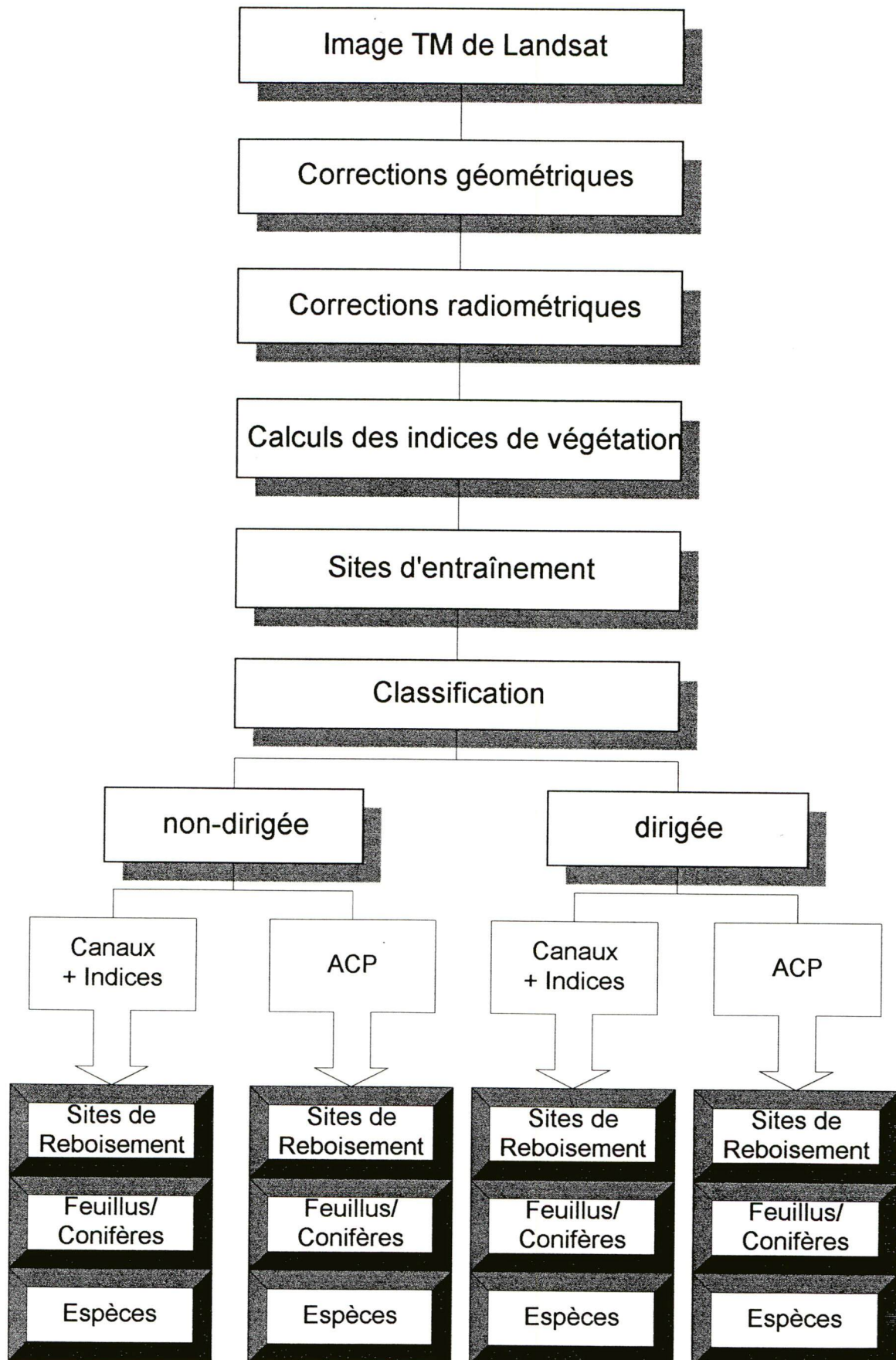


Figure 6 - Étapes de la méthodologie concernant l'image TM de Landsat

$$\text{Gain}(\lambda) = [L_{\max}(\lambda) - L_{\min}(\lambda)] / 255 \quad (2)$$

$$\text{Offset}(\lambda) = L_{\min}(\lambda) \quad (3)$$

Les constantes d'étalonnage propres au capteur TM de Landsat ont été publiées par la NASA (Markham *and* Barker, 1986) et sont résumées dans le tableau 3.

Tableau 3 - Paramètres d'étalonnage du capteur TM de Landsat et valeurs calculées de $L_{\max}(\lambda)$

Bande	$L_{\min}(\lambda) = \text{Offset}(\lambda)$	$L_{\max}(\lambda)$	$\text{Gain}(\lambda)$
	$\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	$\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$	$\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$
TM1	-0,15	10,35	0,06
TM2	-0,28	12,824	0,117
TM3	-0,12	20,535	0,081
TM4	-0,15	10,346	0,082
TM5	-0,037	2,768	0,011
TM7	-0,015	1,515	0,006

Inspiré de Markham *and* Barker (1986, p. 4)

Pour la transformation des luminances apparentes en réflectances apparentes, l'équation est la suivante (Markham *and* Barker, 1986, p. 5) :

$$\rho^*(\lambda) = \frac{\pi L^*(\lambda) D^2}{E_s(\lambda) \cos \theta_s} \quad (4)$$

où $\rho^*(\lambda)$ est la réflectance apparente,

D est la distance moyenne Terre-Soleil (1 unité astronomique),

$E_s(\lambda)$ est l'éclairement solaire moyen hors atmosphère ($\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$),

θ_s est l'angle zénithal solaire (degrés).

Tableau 4 - Paramètres de l'éclairement solaire hors atmosphère pour le capteur TM de Landsat

Bande	$E_s(\lambda)$ $mW \cdot cm^{-2} \cdot \mu m^{-1}$
TM1	195,7
TM2	182,9
TM3	155,7
TM4	104,7
TM5	21,93
TM7	7,452

Modifié de Markham *and* Barker (1986, p. 5)

Pour le calcul de l'angle zénithal solaire, les formules sont les suivantes (Bannari, 1996, p. 61) :

$$\theta_s = \text{Arccos}[\sin(\varphi_s) \sin(\delta) + \cos(\varphi_s) \cos(\delta) \cos(t)] \quad (5)$$

$$\phi_s = \pi + \text{Arcsin}[\cos(\delta) \sin(t) / \sin(\theta_s)] \quad (6)$$

$$\delta = \text{Arcsin}[0,3978 \sin\{ 2\pi (\text{jour} - 80,25) / 365 \}] \quad (7)$$

$$t = H (360^\circ / 24h) \text{ et } H = \text{heure locale} - 12h \quad (8)$$

où φ_s est la latitude du lieu d'observation,
 t est l'angle horaire du soleil en radians,
 δ est la déclinaison du soleil en radians,
jour est le jour de l'acquisition de l'image dans le calendrier julien.

C) Calculs des indices de végétation

Un grand nombre d'indices de végétation ont été développés afin de répondre aux différents besoins et environnements. Les indices de végétation montrent une meilleure sensibilité que les bandes spectrales prises individuellement pour détecter la biomasse. Les quatre indices retenus pour le projet sont résumés dans le tableau 5. Le choix s'est arrêté sur ces quatre indices qui présentaient des différences pouvant faire ressortir les plantations à végétation éparse.

Tableau 5 - Indices de végétation choisis pour le projet

Nom de l'indice	Abréviation	Formule
<i>Normalized Difference</i>		$\frac{(PIR - R)}{(PIR + R)}$
<i>Vegetation Index</i>	NDVI	
<i>Soil Adjusted Vegetation</i>		$\frac{(PIR - R)}{(PIR + R + 0,5)}$
<i>Index</i>	SAVI	
<i>Atmospherically Resistant</i>		$\frac{(PIR - RB)}{(PIR + RB)}$
<i>Vegetation Index</i>	ARVI	$RB = R - \gamma (B - R)$
<i>Modified SAVI</i>	MSAVI	$\frac{2 PIR + 1 - \sqrt{(2 PIR + 1)^2 - 8 (PIR - R)}}{2}$

Modifié de Bannari, (1996, p. 24)

où PIR est la bande du proche infrarouge (TM4),
 R est la bande rouge (TM3),
 B est la bande bleue (TM1),
 L est le facteur d'ajustement du sol,
 γ est une autocorrection atmosphérique.

L'indice NDVI est un indice de type rapport sensible à la photosynthèse. "Le succès du NDVI comme descripteur des variations de la végétation malgré les effets atmosphériques et la dégradation radiométrique des bandes rouge et proche infrarouge réside au niveau de la normalisation." (Bannari, 1996, p. 27).

L'indice SAVI permet de décrire un système sol-végétation pour une végétation éparse (Huete *et al.*, 1997, p. 441). Des recherches à l'aide d'un modèle de transfert radiatif simplifié ont montrées que la valeur $L = 0,5$ permet le meilleur ajustement (Huete, 1988). Le facteur L qui est un facteur d'ajustement indépendant du type de sol ou du capteur permet d'ajuster ou de minimiser l'effet de radiation transmis et reflété par le sol. Si L était égal à zéro, le SAVI serait égal au NDVI.

L'indice ARVI minimise les variations atmosphériques et produit une autocorrection pour les effets atmosphériques sur le canal rouge. La différence de rayonnement entre les canaux bleu et rouge donne un nouveau canal qui minimise les effets atmosphériques causés par les aérosols

dans le canal rouge (Bannari *et al.*, 1995b). Dans notre cas, la valeur de γ est égale à 1 comme proposé dans la littérature, le modèle des aérosols n'étant pas connu (Kaufman *and* Tanré, 1992).

Il a été démontré par Qi (1993) et par Qi *et al.* (1994) que le facteur L du SAVI n'est pas une constante mais plutôt une fonction inversement proportionnelle à la quantité de végétation présente. Ils ont donc proposé le MSAVI pour minimiser l'effet du sol nu sur le SAVI.

D) Sites d'entraînement

Une sous-image TM de 1 020 pixels X 800 lignes couvre la carte Colomi (6441-IV 1 : 50 000). Le choix des classes est basé sur les informations de la base de données, *Programa de Repoblamiento Forestal*, sur les plantations de reboisement. Seulement trois espèces d'arbres sans mélange d'espèces sont identifiées dans la base de données pour le secteur à l'étude. Il y a une espèce d'arbre feuillu, l'*Eucalyptus globulus*, et deux espèces de conifères, le *Pinus radiata* et le *Pinus pseudostrobus*.

Étant donné que les sites de reboisement sont datés seulement par l'année et afin d'éviter l'erreur de situer une plantation qui n'aurait pas existé au moment de la prise de l'image, seules les plantations créées entre 1986 et 1989 ont été identifiées.

Les superficies des plantations sont petites pour la résolution spatiale de l'image. Elles varient entre 0,5 ha et 12,0 ha. La superficie du site d'entraînement est un peu inférieure à celle mentionnée dans la base de données et il est centré à partir des coordonnées géographiques spécifiées dans cette même base de données. Le tableau 6 récapitule le nombre de pixels pour chaque classe.

Tableau 6 - Nombre de pixels par classe pour l'ensemble des sites d'entraînement pour la sous-image TM de Landsat

Classe	Description	Nombre de sites	Nombre de pixels	% pixels par rapport à l'image totale
1	<i>Eucalyptus globulus</i>	15	277	0,03 %
2	<i>Pinus radiata</i>	25	546	0,07 %
3	<i>Pinus pseudostrobus</i>	9	399	0,05 %
	Image totale		816 000	

E) Classification

Deux méthodes de classification ont été utilisées: les méthodes de classification non-dirigée et dirigée, par maximum de vraisemblance. Les classifications ont été effectuées à l'aide des 6 canaux de base de l'image excluant la bande thermique (TM1, TM2, TM3, TM4, TM5, TM7). Ensuite, d'autres classifications ont été faites à l'aide de ces 6 mêmes canaux et chacun des indices de végétation. Plusieurs tests de classification ont été utilisés pour les classifications de façon évolutive afin d'atteindre les objectifs.

Théoriquement, le choix des bandes spectrales se fait à l'aide de la matrice de corrélation des différentes classes selon les différentes bandes. Les taux de corrélation les plus faibles dans la matrice de corrélation indiquent une très bonne séparabilité entre les classes et normalement le choix s'arrête sur ces bandes. Dans le cas présent, le but vise l'utilisation des six bandes spectrales pour plusieurs raisons.

Selon Guyot (1989), les six bandes spectrales permettent la caractérisation de la végétation. Comme dans la littérature scientifique il n'y a pas d'études existantes semblables à celle-ci sur les espèces d'arbres en question, toutes les possibilités sur le choix des bandes spectrales sont plausibles dans un premier temps.

Selon le *Landsat Program* de la NASA, chacune des bandes TM présente des caractéristiques aptes à repérer la végétation sur une image. La bande TM1 est conçue pour discriminer la végétation et le sol ainsi que pour cartographier les types de forêt de conifères et de feuillus. TM2 correspond avec la crête de la courbe de réflectance de la végétation dans le jaune-vert et elle est recommandée pour la discrimination de la végétation sur une image. TM3 correspond à la région d'absorption de la chlorophylle et elle est très bonne pour détecter différents types de végétation. TM4 est utilisée pour déterminer la biomasse et elle sépare très bien la végétation de l'eau. TM5 et TM7 procurent un bon contraste pour différents types de végétation car elles sont très sensibles à la quantité d'eau contenue dans la végétation. (Landsat Program (1997); Guyot, 1989)

De plus, l'utilisation des mêmes bandes spectrales pour chacune des classifications faites à l'aide d'un indice de végétation, permet d'évaluer sur une même base de comparaison l'intérêt et la performance de chacun des indices de végétation pour l'amélioration du pourcentage d'exactitude des tests de classification.

Pour la classification non-dirigée, trois tests de classification ont été réalisés progressivement. Le premier essai s'appliquait sur trois classes de la façon suivante :

- sites de reboisement : regroupant les trois espèces d'arbres des sites de reboisement,
- eau : regroupant les lacs et cours d'eau,
- autres : regroupant les infrastructures (5 %), les sols nus (2 %) et la végétation naturelle (93 %).

La végétation naturelle est composée de cultures, de paturages et de plusieurs espèces végétales. À noter que le sol est très rarement à nu mais plutôt recouvert de mousses et de petites plantes.

Un deuxième test consistait à différencier les deux ensembles d'arbres des sites de reboisement entre eux c'est-à-dire les feuillus et les conifères. Pour ce test, il y avait quatre classes :

- feuillus : l'espèce *Eucalyptus globulus*,
- conifères : regroupant l'espèce *Pinus radiata* et l'espèce *Pinus pseudostrobus*,
- eau : regroupant les lacs et cours d'eau,
- autres : regroupant les infrastructures (5 %), les sols nus (2 %) et la végétation naturelle (93 %).

Le dernier test consistait à différencier chacune des espèces entre elles. Il y avait donc cinq classes :

- Pinus radiata*,
- Pinus pseudostrobus*,
- Eucalyptus globulus*,

- eau : regroupant les lacs et cours d'eau,
- autres : regroupant les infrastructures (5 %), les sols nus (2 %) et la végétation naturelle (93 %).

Pour chacun des tests, l'exactitude de la classification pour chaque classe a été calculée. Les calculs ont été faits à partir des formules présentées par Bonn et Rochon (1992, p. 365). Les tableaux 7, 8 et 9 récapitulent chacun des tests pour la classification non-dirigée.

Pour la classification dirigée, les mêmes essais ont été faits. À noter que la classe autres de la classification non-dirigée est englobée dans les pixels non-classés au lieu de former une classe distincte. Les tableaux 10, 11 et 12 récapitulent chacun des tests pour la classification dirigée.

Tableau 7 - Exactitude des tests de classification non-dirigée pour distinguer les sites de reboisement sur l'image TM de Landsat

Canaux utilisés	% d'exactitude classe sites de reboisement
6 canaux	80 %
6 canaux + NDVI	81 %
6 canaux + SAVI	78 %
6 canaux + ARVI	80 %
6 canaux + MSAVI	77 %

Tableau 8 - Exactitude des tests de classification non-dirigée pour distinguer les feuillus et les conifères sur les sites de reboisement sur l'image TM de Landsat

Canaux Utilisés	% d'exactitude classe feuillus	% d'exactitude classe conifères
6 canaux	41 %	48 %
6 canaux + NDVI	49 %	53 %
6 canaux + SAVI	29 %	45 %
6 canaux + ARVI	43 %	51 %
6 canaux + MSAVI	10 %	43 %

Tableau 9 - Exactitude des tests de classification non-dirigée pour distinguer les espèces d'arbres sur les sites de reboisement sur l'image TM de Landsat

Canaux Utilisés	% d'exactitude classe <i>Eucalyptus</i> <i>globulus</i>	% d'exactitude classe <i>Pinus</i> <i>radiata</i>	% d'exactitude classe <i>Pinus</i> <i>pseudostrobus</i>
6 canaux	33 %	26 %	47 %
6 canaux + NDVI	40 %	39 %	57 %
6 canaux + SAVI	28 %	23 %	45 %
6 canaux + ARVI	35 %	36 %	49 %
6 canaux + MSAVI	11 %	14 %	42 %

Tableau 10 - Exactitude des tests de classification dirigée pour distinguer les sites de reboisement sur l'image TM de Landsat

Canaux Utilisés	% d'exactitude classe sites de reboisement
6 canaux	82 %
6 canaux + NDVI	74 %
6 canaux + SAVI	77 %
6 canaux + ARVI	81 %
6 canaux + MSAVI	77 %

Tableau 11 - Exactitude des tests de classification dirigée pour distinguer les feuillus et les conifères sur les sites de reboisement sur l'image TM de Landsat

Canaux utilisés	% d'exactitude classe feuillus	% d'exactitude classe conifères
6 canaux	64 %	62 %
6 canaux + NDVI	60 %	57 %
6 canaux + SAVI	59 %	58 %
6 canaux + ARVI	62 %	56 %
6 canaux + MSAVI	62 %	60 %

Tableau 12 - Exactitude des tests de classification dirigée pour distinguer les espèces d'arbres sur les sites de reboisement sur l'image TM de Landsat

Canaux Utilisés	% d'exactitude classe <i>Eucalyptus globulus</i>	% d'exactitude classe <i>Pinus radiata</i>	% d'exactitude classe <i>Pinus pseudostrobus</i>
6 canaux	56 %	54 %	57 %
6 canaux + NDVI	52 %	46 %	55 %
6 canaux + SAVI	52 %	48 %	58 %
6 canaux + ARVI	53 %	60 %	51 %
6 canaux + MSAVI	53 %	48 %	57 %

Par la suite, une analyse en composantes principales (transformée de Hotelling) a été exécutée à l'aide des mêmes canaux de départ selon les mêmes tests que précédemment. Les canaux résultants de l'analyse en composantes principales ont été choisis pour la classification selon un seuil de probabilité de 95 %.

Par exemple, dans le premier cas, l'analyse en composantes principales a été exécutée à l'aide des 6 canaux de base (TM1, TM2, TM3, TM4, TM5 et TM7) mais la classification a été réalisée à l'aide des deux premiers canaux résultants de l'analyse en composantes principales (ACP1 et ACP2). La même méthode a été appliquée ensuite sur les six canaux de base pris avec chacun des indices de végétation.

Les tableaux récapitulatifs 13, 14 et 15 concernent la classification non-dirigée pour les tests selon l'analyse en composantes principales et les tableaux 16, 17 et 18 concernent la classification dirigée.

où ACP1 = Première composante de l'analyse en composantes principales
ACP2 = Deuxième composante de l'analyse en composantes principales

Tableau 13 - Exactitude des tests de classification non-dirigée selon l'analyse en composantes principales pour distinguer les sites de reboisement sur l'image TM de Landsat

Canaux de départ	Canaux Utilisés	% d'exactitude classe sites de reboisement
6 canaux	ACP1 + ACP2	66 %
6 canaux + NDVI	ACP1 + ACP2	76 %
6 canaux + SAVI	ACP1 + ACP2	71 %
6 canaux + ARVI	ACP1 + ACP2	84 %
6 canaux + MSAVI	ACP1 + ACP2	80 %

Tableau 14 - Exactitude des tests de classification non-dirigée selon l'analyse en composantes principales pour distinguer les feuillus et les conifères sur les sites de reboisement sur l'image TM de Landsat

Canaux de départ	Canaux utilisés	% d'exactitude classe feuillus	% d'exactitude classe conifères
6 canaux	ACP1 + ACP2	48 %	43 %
6 canaux + NDVI	ACP1 + ACP2	76 %	50 %
6 canaux + SAVI	ACP1 + ACP2	42 %	38 %
6 canaux + ARVI	ACP1 + ACP2	40 %	55 %
6 canaux + MSAVI	ACP1 + ACP2	47 %	56 %

Tableau 15 - Exactitude des tests de classification non-dirigée selon l'analyse en composantes principales pour distinguer les espèces d'arbres sur les sites de reboisement sur l'image TM de Landsat

Canaux de départ	Canaux utilisés	% d'exactitude classe <i>Eucalyptus globulus</i>	% d'exactitude classe <i>Pinus radiata</i>	% d'exactitude classe <i>Pinus pseudostrobus</i>
6 canaux	ACP1 + ACP2	41 %	19 %	43 %
6 canaux + NDVI	ACP1 + ACP2	28 %	31 %	50 %
6 canaux + SAVI	ACP1 + ACP2	38 %	28 %	46 %
6 canaux + ARVI	ACP1 + ACP2	35 %	40 %	57 %
6 canaux + MSAVI	ACP1 + ACP2	39 %	41 %	54 %

Tableau 16 - Exactitude des tests de classification dirigée selon l'analyse en composantes principales pour distinguer les sites de reboisement sur l'image TM de Landsat

Canaux de départ	Canaux utilisés	% d'exactitude classe sites de reboisement
6 canaux	ACP1 + ACP2	96 %
6 canaux + NDVI	ACP1 + ACP2	95 %
6 canaux + SAVI	ACP1 + ACP2	95 %
6 canaux + ARVI	ACP1 + ACP2	95 %
6 canaux + MSAVI	ACP1 + ACP2	95 %

Tableau 17 - Exactitude des tests de classification dirigée selon l'analyse en composantes principales pour distinguer les feuillus et les conifères sur les sites de reboisement sur l'image TM de Landsat

Canaux de départ	Canaux utilisés	% d'exactitude classe feuillus	% d'exactitude classe conifères
6 canaux	ACP1 + ACP2	64 %	61 %
6 canaux + NDVI	ACP1 + ACP2	64 %	62 %
6 canaux + SAVI	ACP1 + ACP2	65 %	64 %
6 canaux + ARVI	ACP1 + ACP2	68 %	57 %
6 canaux + MSAVI	ACP1 + ACP2	64 %	63 %

Tableau 18 - Exactitude des tests de classification dirigée selon l'analyse en composantes principales pour distinguer les espèces d'arbres sur les sites de reboisement sur l'image TM de Landsat

Canaux De départ	Canaux utilisés	% d'exactitude classe <i>Eucalyptus</i> <i>globulus</i>	% d'exactitude classe <i>Pinus</i> <i>radiata</i>	% d'exactitude classe <i>Pinus</i> <i>pseudostrobus</i>
6 canaux	ACP1 + ACP2	55 %	49 %	53 %
6 canaux + NDVI	ACP1 + ACP2	52 %	51 %	55 %
6 canaux + SAVI	ACP1 + ACP2	51 %	50 %	55 %
6 canaux + ARVI	ACP1 + ACP2	53 %	52 %	45 %
6 canaux + MSAVI	ACP1 + ACP2	50 %	51 %	55 %

2.3.2. Image ROS de RADARSAT

Un organigramme des étapes de la méthodologie concernant l'image ROS de RADARSAT a été élaboré à la figure 7.

A) Corrections géométriques

Les corrections géométriques de l'image radar ont été effectuées de la même façon que l'image TM. La correction géométrique a été réalisée à l'aide de 8 points de contrôle répartis proportionnellement sur l'ensemble de l'image. L'erreur moyenne quadratique est de 32,0 pixels calculée selon un polynôme de premier degré.

B) Calcul de la fenêtre optimale

Le succès du processus de classification à l'aide de paramètres de texture dépend de la taille de la fenêtre sur laquelle ces paramètres sont calculés. La fenêtre optimale provient du calcul du coefficient de variation d'un paramètre quelconque pour chacune des classes de l'image en fonction de la taille de la fenêtre. Le choix se fait sur la fenêtre où le coefficient de variation est stable pour la majorité des classes tout en ayant la plus faible valeur sur le graphique (Anys, 1995).

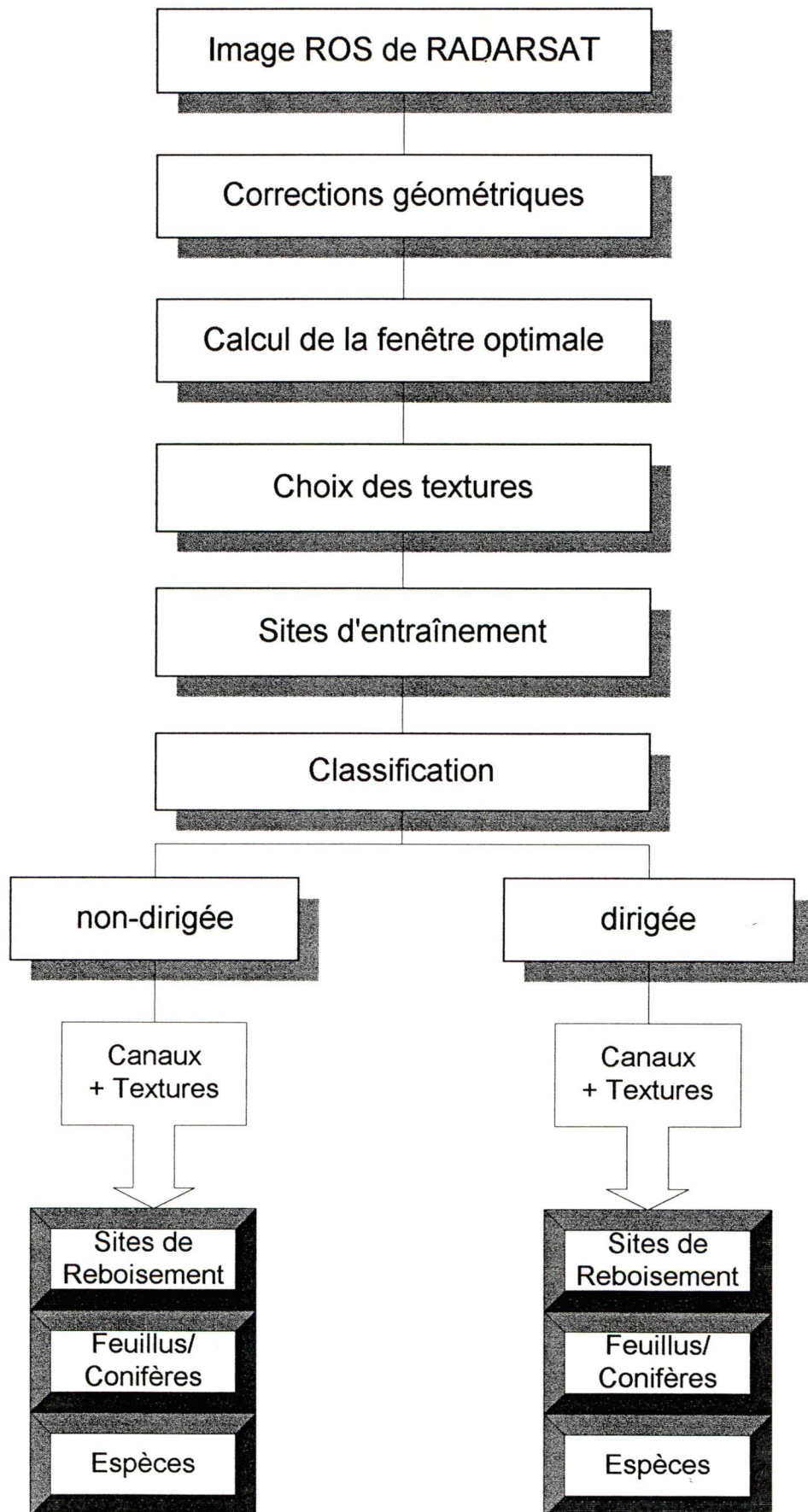


Figure 7 - Étapes de la méthodologie concernant l'image ROS de RADARSAT

Une sous-image de 544 pixels X 676 lignes représentative des différentes classes a été créée pour calculer la fenêtre optimale qui sera utilisée par la suite. La texture utilisée pour faire ce test a été choisie au hasard et le choix s'est arrêté sur le paramètre contraste. Le coefficient de variation se calcule ainsi :

$$\text{Coefficient de variation} = \frac{\text{écart-type}}{\text{moyenne}} \quad (9)$$

À l'aide du graphique (figure 8), le choix de la fenêtre optimale s'est fait sur la fenêtre de grandeur 11 X 11.

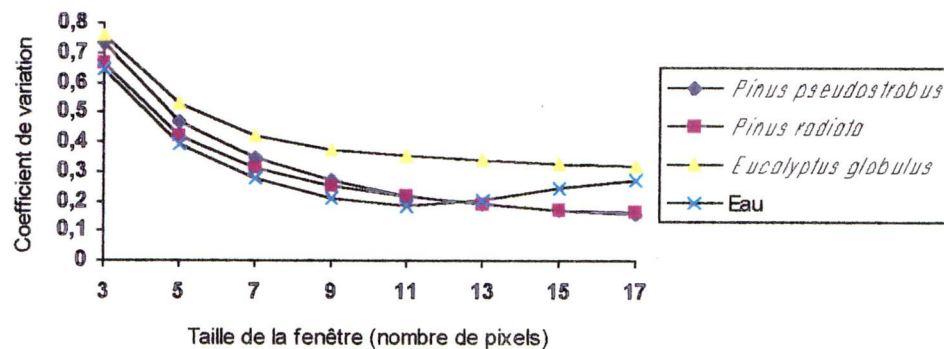


Figure 8 - Variation du coefficient de variation selon la taille de la fenêtre et de l'espèce forestière considérée pour le paramètre contraste

C) Choix des textures

"À l'inverse de l'information spectrale donnée par le niveau de gris ou la classe de niveaux de gris dans une image, l'information texturale est déterminée par la forme et la configuration d'un groupe de pixels de niveaux de gris différents" (Bonn et Rochon, 1993, p. 383).

Huit paramètres de texture ont été appliqués sur la zone d'étude: homogénéité, contraste, dissimilarité, moyenne, écart-type, entropie, second moment angulaire et corrélation. À partir de la matrice de corrélation calculée pour ces huit paramètres, quatre ont été retenus :

homogénéité, entropie, second moment angulaire et corrélation. Ces paramètres fournissent les taux de corrélation les plus faibles.

D) Sites d'entraînement

Une sous-image ROS de 4 640 pixels X 3 200 lignes couvre la carte Colomi (6441-IV 1 : 50 000). L'espacement des pixels a été modifié à 6,25 m afin de réduire l'espace mémoire et de ne pas surestimer l'information. Les classes et les sites d'entraînement utilisés sont les mêmes que pour l'image TM. Comme la résolution spatiale de cette image est plus fine que celle du capteur TM de Landsat, le nombre de pixels pour chacune des plantations est plus élevé. Le tableau 19 récapitule le nombre de pixels pour chaque classe.

Tableau 19 - Nombre de pixels par classe pour l'ensemble des sites d'entraînement pour la sous-image ROS de RADARSAT

Classe	Description	Nombre de sites	Nombre de pixels	% pixels par rapport à l'image totale
1	<i>Eucalyptus globulus</i>	15	7 836	0,05
2	<i>Pinus radiata</i>	25	13 305	0,09
3	<i>Pinus pseudostrobus</i>	9	9 932	0,07
	Image totale		14 848 000	

E) Classification

Les méthodes de classification utilisées sont les mêmes que pour l'image TM. La classification s'est effectuée dans un premier temps à l'aide de l'image et des quatre néo-canaux de textures. Ensuite, une classification a été faite à l'aide de l'image et de chacun des néo-canaux de textures pris séparément. Enfin, une classification a été effectuée à l'aide de l'image et de la combinaison de trois couples de néo-canaux texturaux qui présentent les plus faibles taux de corrélation. Ces trois couples texturaux sont : l'homogénéité avec la corrélation, l'entropie avec la corrélation et le second moment angulaire avec la corrélation.

Les trois tests de classification ont été les mêmes pour la classification. Les tableaux 20, 21 et 22 concernent la classification non-dirigée et les tableaux 23, 24 et 25 la classification dirigée.

où HOMO = Homogénéité
 ENTR = Entropie
 SMAN = Second moment angulaire
 CORR = Corrélation

Tableau 20 - Exactitude des tests de classification non-dirigée pour distinguer les sites de reboisement sur l'image ROS de RADARSAT

Canaux utilisés	% d'exactitude classe sites de reboisement
Image + HOMO + ENTR + SMAN + CORR	89 %
Image + HOMO	99 %
Image + ENTR	99 %
Image + SMAN	98 %
Image + CORR	79 %
Image + HOMO + CORR	98 %
Image + ENTR + CORR	97 %
Image + SMAN + CORR	97 %

Tableau 21 - Exactitude des tests de classification non-dirigée pour distinguer les feuillus et les conifères sur les sites de reboisement sur l'image ROS de RADARSAT

Canaux Utilisés	% d'exactitude classe feuillus	% d'exactitude classe conifères
Image + HOMO + ENTR + SMAN + CORR	43 %	45 %
Image + HOMO	36 %	43 %
Image + ENTR	55 %	53 %
Image + SMAN	32 %	40 %
Image + CORR	46 %	41 %
Image + HOMO + CORR	49 %	54 %
Image + ENTR + CORR	60 %	56 %
Image + SMAN + CORR	48 %	49 %

Tableau 22 - Exactitude des tests de classification non-dirigée pour distinguer les espèces d'arbres sur les sites de reboisement sur l'image ROS de RADARSAT

Canaux Utilisés	% d'exactitude classe <i>Eucalyptus</i> <i>globulus</i>	% d'exactitude classe <i>Pinus</i> <i>radiata</i>	% d'exactitude classe <i>Pinus</i> <i>pseudostrobus</i>
Image + HOMO + ENTR + SMAN + CORR	40 %	23 %	33 %
Image + HOMO	40 %	28 %	33 %
Image + ENTR	39 %	41 %	35 %
Image + SMAN	26 %	26 %	27 %
Image + CORR	36 %	24 %	31 %
Image + HOMO + CORR	36 %	17 %	29 %
Image + ENTR + CORR	43 %	40 %	40 %
Image + SMAN + CORR	36 %	32 %	33 %

Tableau 23 -Exactitude des tests de classification dirigée pour distinguer les sites de reboisement sur l'image ROS de RADARSAT

Canaux utilisés	% d'exactitude classe sites de reboisement
Image + HOMO + ENTR + SMAN + CORR	92 %
Image + HOMO	98 %
Image + ENTR	97 %
Image + SMAN	98 %
Image + CORR	95 %
Image + HOMO + CORR	95 %
Image + ENTR + CORR	95 %
Image + SMAN + CORR	95 %

Tableau 24 - Exactitude des tests de classification dirigée pour distinguer les feuillus et les conifères sur les sites de reboisement sur l'image ROS de RADARSAT

Canaux Utilisés	% d'exactitude classe feuillus	% d'exactitude classe conifères
Image + HOMO + ENTR + SMAN + CORR	41 %	39 %
Image + HOMO	60 %	58 %
Image + ENTR	58 %	58 %
Image + SMAN	57 %	59 %
Image + CORR	47 %	18 %
Image + HOMO + CORR	49 %	47 %
Image + ENTR + CORR	49 %	47 %
Image + SMAN + CORR	48 %	41 %

Tableau 25 - Exactitude des tests de classification dirigée pour distinguer les espèces d'arbres sur les sites de reboisement sur l'image ROS de RADARSAT

Canaux Utilisés	% d'exactitude classe <i>Eucalyptus</i> <i>globulus</i>	% d'exactitude classe <i>Pinus</i> <i>radiata</i>	% d'exactitude classe <i>Pinus</i> <i>pseudostrobus</i>
Image + HOMO + ENTR + SMAN + CORR	39 %	36 %	16 %
Image + HOMO	46 %	39 %	39 %
Image + ENTR	46 %	43 %	40 %
Image + SMAN	48 %	43 %	38 %
Image + CORR	50 %	34 %	12 %
Image + HOMO + CORR	50 %	35 %	11 %
Image + ENTR + CORR	47 %	35 %	11 %
Image + SMAN + CORR	46 %	35 %	11 %

2.3.3. Combinaison des images TM et ROS

Un organigramme des étapes de la méthodologie concernant la combinaison des images TM et ROS a été élaboré à la figure 9.

A) Corrections géométriques

L'image ROS de RADARSAT a été superposée à l'image TM de Landsat par la méthode du plus proche voisin. Le logiciel utilise les fichiers de points de contrôle créés précédemment et contenant toutes les informations de la projection cartographique et les limites géoréférencées des images.

B) Choix des combinaisons de canaux des deux images

Le choix des combinaisons de canaux des images du visible et du radar s'est fait à partir des premiers résultats d'exactitude des tests de classification des deux images prises individuellement. Le choix s'est arrêté sur les résultats statistiques les plus forts. Le tableau 26 résume les trois combinaisons faites selon les trois tests de classification.

Tableau 26 - Combinaisons des images TM de Landsat et ROS de RADARSAT

Combinaison	Canaux utilisés de l'image		Canaux utilisés de l'image
	TM de Landsat		ROS de RADARSAT
Combinaison 1	6 canaux	ACP1 + ACP2	Image + HOMO
Combinaison 2	6 canaux + NDVI	ACP1 + ACP2	Image + HOMO
Combinaison 3	6 canaux		Image + ENTR

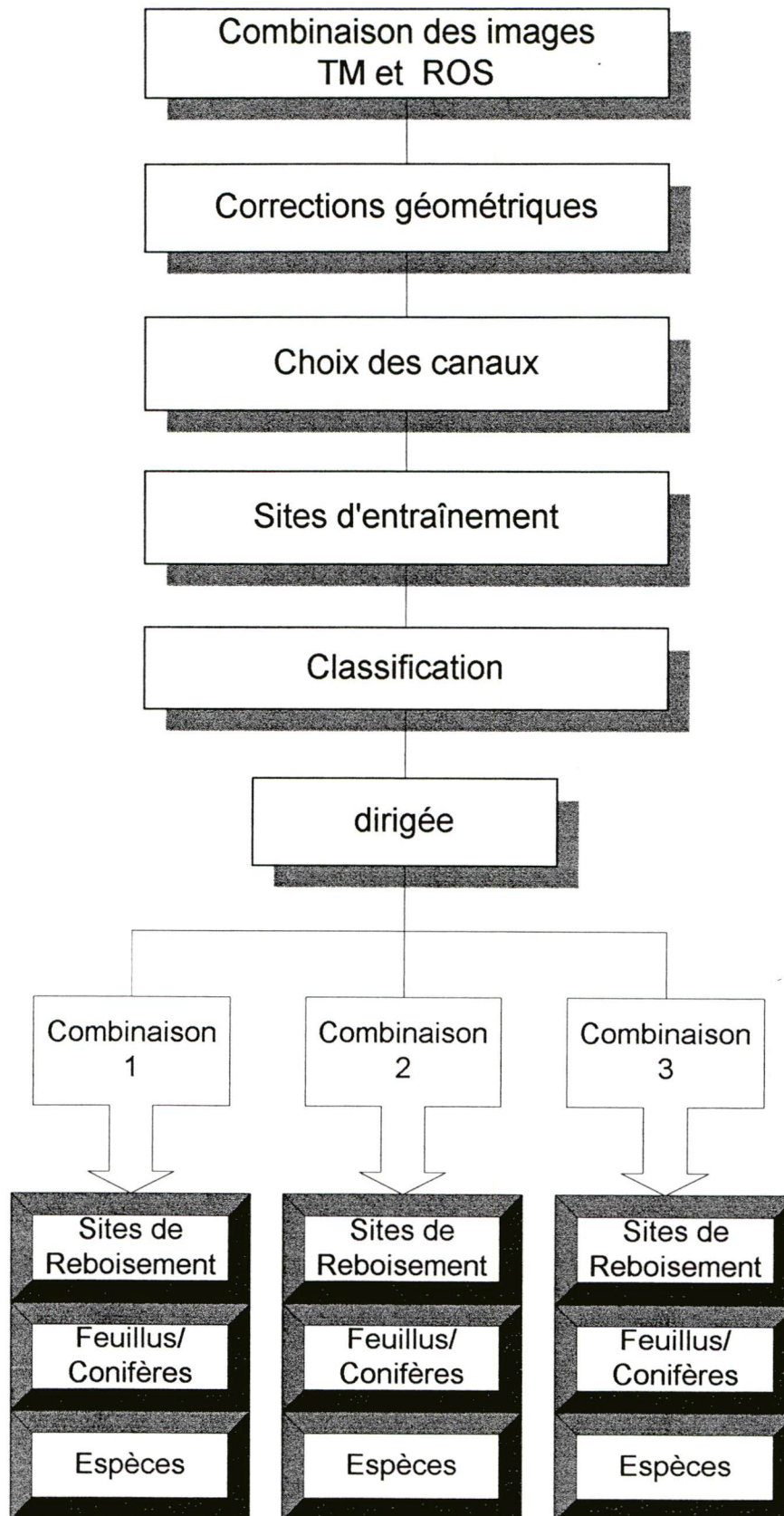


Figure 9 - Étapes de la méthodologie concernant la combinaison des images TM de Landsat et ROS de RADARSAT

C) Classification

La méthode de classification choisie est la méthode de classification dirigée par maximum de vraisemblance car les taux d'exactitude sont, dans la majorité des cas, plus élevés que ceux des classifications non-dirigées. Les sites d'entraînement étaient les mêmes que précédemment. Les trois tests de classification ont aussi été les mêmes pour la classification. Les tableaux 27 à 29 regroupent les résultats des classifications concernant les combinaisons de canaux des images du visible et du radar.

Tableau 27 - Exactitude des tests de classification dirigée pour distinguer les sites de reboisement à l'aide de la combinaison des images TM de Landsat et ROS de RADARSAT

Canaux utilisés	% d'exactitude classe sites de reboisement
Combinaison 1	92 %
Combinaison 2	87 %
Combinaison 3	70 %

Tableau 28 - Exactitude des tests de classification dirigée pour distinguer les feuillus et les conifères sur les sites de reboisement à l'aide de la combinaison des images TM de Landsat et ROS de RADARSAT

Canaux utilisés	% d'exactitude classe feuillus	% d'exactitude classe conifères
Combinaison 1	64 %	63 %
Combinaison 2	61 %	63 %
Combinaison 3	56 %	56 %

Tableau 29 - Exactitude des tests de classification dirigée pour distinguer les espèces d'arbres sur les sites de reboisement à l'aide de la combinaison des images TM de Landsat et ROS de RADARSAT

Canaux Utilisés	% d'exactitude classe <i>Eucalyptus</i> <i>globulus</i>	% d'exactitude classe <i>Pinus</i> <i>radiata</i>	% d'exactitude classe <i>Pinus</i> <i>pseudostrobus</i>
Combinaison 1	52 %	47 %	54 %
Combinaison 2	48 %	48 %	56 %
Combinaison 3	50 %	43 %	54 %

3. Explications des résultats

Des explications sur les résultats obtenus suivent dans le présent chapitre sous forme d'analyse et de discussion.

3.1 Analyse des résultats

L'analyse des résultats se divise en trois parties selon les trois tests de classification (sites de reboisement, feuillus/conifères et espèces).

3.1.1. Tests pour distinguer les sites de reboisement

On constate que les statistiques de classification pour distinguer les sites de reboisement, c'est-à-dire l'ensemble des sites de reboisement sur les images TM sont entre 66 % et 96 %, pour les images ROS entre 79 % et 99 % et pour la combinaison des images entre 70 % et 92 %. En observant les cartes thématiques, on voit qu'il est impossible de différencier un site de reboisement du reste de la végétation identifiée sur les images. On observe que les résultats des classifications dirigées ont, en général, des taux d'exactitude plus élevés que ceux des classifications non-dirigées surtout pour le test des composantes principales de l'image TM.

Le tableau 30 est une récapitulation des meilleurs résultats statistiques pour distinguer les sites de reboisement. Pour l'image TM il s'agit de la classification dirigée selon l'analyse en composantes principales à l'aide des 6 canaux de départ (TM1, TM2, TM3, TM4, TM5 et TM7) avec 96 %. Pour l'image ROS, la classification dirigée à l'aide de l'image et de la texture homogénéité donne le plus haut pourcentage avec 98 %, ce qui dépasse même le résultat de l'image TM. La combinaison 1 des images TM et F2 c'est-à-dire des deux premières composantes principales des 6 canaux de base de l'image TM et l'image ROS avec la texture homogénéité a 92 % comme plus haut pourcentage statistique.

Tableau 30 - Récapitulation des meilleurs tests de classification pour distinguer les sites de reboisement à l'aide des différents capteurs

Capteur	Meilleur test de classification	% d'exactitude
TM de Landsat	Dirigée ACP (TM1,TM2,TM3,TM4,TM5,TM7)	96 %
ROS de RADARSAT	Dirigée (Image, homogénéité)	98 %
TM et ROS	6 canaux (ACP1 + ACP2) et Image, homogénéité	92 %

Suite à l'observation des tableaux 7, 10, 13, 16, 20, 23 et 27 et des images résultantes (annexe 1), on remarque que les résultats sont très intéressants. Chaque plantation est constituée d'une espèce d'arbre et de la végétation naturelle qui se compose de mousses et de petites plantes d'une hauteur maximale de 1 m. Le mélange et la présence des deux sortes de végétation (végétation de la plantation et végétation native) crée une confusion dans la classification et par le fait même dans la détermination des limites du périmètre du site de reboisement.

Le projet est réalisée à l'aide de jeunes plantations où les arbres n'ont pas encore atteint leur maturité. On peut voir à la figure 10 une plantation de *Pinus radiata* où on retrouve une faible uniformité dans les plants et une densité moyennement faible. L'espacement entre les arbres est environ de 2,5 m à 3 m et la hauteur moyenne des arbres est environ de 2,5 m. Le sol est couvert de mousses, d'herbes sèches(paille) et de petits arbustes (ce que l'on aperçoit en premier plan sur la figure 10).

Connaissant la cohabitation des deux végétations (végétation de la plantation et végétation native), on comprend mieux le contenu réel du site de reboisement et la confusion entre l'essence des arbres de la plantation et le reste de son environnement. La difficulté de différencier un site de reboisement du reste de la végétation identifiée sur les images est donc un problème mineur. Il s'agirait de définir exactement sur le terrain le périmètre de chacune des plantations et identifier ainsi le site d'entraînement sur les images.



Figure 10 - Plantation de *Pinus radiata*, Bolivie

3.1.2. Tests pour distinguer les feuillus et les conifères

En ce qui concerne les classifications pour distinguer les feuillus des conifères, les statistiques sont entre 10 % et 76 % pour l'image TM, entre 18 % et 60 % pour l'image ROS et entre 56 % et 64 % pour la combinaison des canaux des deux images.

Les statistiques des groupes feuillus et conifères sont assez semblables selon le même test. Cette constatation vaut autant pour les tests faits sur les images individuelles que sur les tests à l'aide de la combinaison des canaux des deux images. Le tableau 31 récapitule les meilleurs résultats pour distinguer les feuillus des conifères.

Le meilleur résultat pour distinguer les deux ensembles d'arbres sur l'image du Landsat est la classification non-dirigée des composantes principales à l'aide des 6 canaux de base et de l'indice de végétation NDVI. Le résultat est de 76 % pour les feuillus et de 50 % pour les conifères. Pour l'image de RADARSAT, la classification dirigée à l'aide de l'image et de la

texture homogénéité est la meilleure avec 60 % pour les feuillus et 58 % pour les conifères. Les résultats de l'image TM sont meilleurs à ceux de l'image ROS.

Le meilleur résultat provenant de la combinaison des canaux des deux images est la combinaison 1 (ACP1 et ACP2 des 6 canaux de base de TM et l'image ROS avec la texture homogénéité). Le résultat est de 64 % pour les feuillus et de 63 % pour les conifères.

Tableau 31 - Récapitulation des meilleurs tests de classification pour distinguer les feuillus et les conifères sur les sites de reboisement à l'aide des différents capteurs

Capteur	Meilleur test de classification	% d'exactitude	
TM de Landsat	Non-dirigée ACP (TM1,TM2,TM3,TM4,TM5,TM7,NDVI)	Feuillus	76 %
		Conifères	50 %
ROS de RADARSAT	Dirigée (Image, homogénéité)	Feuillus	60 %
		Conifères	58 %
TM et ROS	6 canaux (ACP1 + ACP2) et Image, homogénéité	Feuillus	64 %
		Conifères	63 %

3.1.3. Tests pour distinguer les espèces

Pour distinguer les espèces entre elles, les statistiques pour l'image TM sont entre 11 % et 57 %, pour l'image ROS entre 11 % et 50 % et pour la combinaison des deux images entre 43 % et 56 %. En observant les cartes thématiques, on voit que le site de reboisement a été reconnu comme telle espèce mais la délimitation de son périmètre reste ambiguë ou est confondue avec le reste de son environnement. La solution d'avoir le périmètre bien défini dans les données de la base de données résolverait le problème de délimitation.

Les statistiques des différentes espèces montrent qu'il est plus difficile de discriminer l'espèce *Pinus radiata* que les deux autres espèces sauf pour le test de classification dirigée de l'image ROS où, c'est le *Pinus pseudostrobus* qui est le plus difficile à être discriminé. La forme physique des arbres explique ces résultats puisque la forme de la couronne des arbres diffère d'une essence à une autre et contribue ainsi à la sensibilité des ondes. Le *Pinus pseudostrobus* a une forme conique avec beaucoup de branches rapprochées et de longues épines tout autour de

la branche, tandis que le *Pinus radiata* a une forme plus allongée et possède peu de branches assez distantes les unes des autres avec de courtes épines surtout sur le bout des branches.

Enfin, le meilleur résultat pour distinguer les trois espèces entre elles pour l'image TM est la classification dirigée à l'aide des 6 canaux de base et de l'indice ARVI. Les résultats sont 53 % pour l'*Eucalyptus globulus*, 60 % pour le *Pinus radiata* et 51 % pour le *Pinus pseudostrobus*. Sur l'image de RADARSAT, la classification dirigée à l'aide de l'image et de la texture entropie est le meilleur résultat pour les trois classes soit 46 % pour les feuillus, 43 % pour les *Pinus radiata* et 40 % pour les *Pinus pseudostrobus*. Les résultats statistiques de l'image TM sont un peu plus élevés que pour l'image ROS.

En ce qui concerne la combinaison des canaux des deux images, le meilleur résultat est la combinaison 1 avec 52 % pour l'*Eucalyptus globulus*, 47 % pour le *Pinus radiata* et 54 % pour le *Pinus pseudostrobus*. Le tableau 32 récapitule les meilleurs test de classification selon les différents capteurs utilisés.

Tableau 32 - Récapitulation des meilleurs tests de classification pour distinguer les espèces d'arbres sur les sites de reboisement à l'aide des différents capteurs

Capteur	Meilleur test de classification	% d'exactitude	
TM de Landsat	Dirigée (TM1,TM2,TM3,TM4,TM5,TM7,ARVI)	<i>Eucalyptus Globulus</i>	53 %
		<i>Pinus Radiata</i>	60 %
		<i>Pinus Pseudostrobus</i>	51 %
ROS de RADARSAT	Dirigée (Image, entropie)	<i>Eucalyptus Globulus</i>	46 %
		<i>Pinus Radiata</i>	43 %
		<i>Pinus Pseudostrobus</i>	40 %
TM et ROS	6 canaux (ACP1 + ACP2) et Image, homogénéité	<i>Eucalyptus Globulus</i>	52 %
		<i>Pinus Radiata</i>	47 %
		<i>Pinus Pseudostrobus</i>	54 %

L'analyse visuelle des cartes thématiques des sites de reboisement nous montre que les pixels non-classés dans un site d'entraînement se situent en majorité en bordure du site puisque les arbres en bordure du périmètre sont plus aptes à subir les effets néfastes du vent, des intempéries et du vandalisme par les hommes et les animaux. Une conclusion tirée de cette observation est qu'il faudrait délimiter les sites de reboisement à l'aide d'un site d'entraînement

plus centré à l'intérieur du périmètre. Une meilleure connaissance des limites du site de reboisement permettrait d'éviter quelques pixels non-classés si jamais la plantation a diminué, vue la mortalité plus forte en bordure du périmètre.

3.2. Discussion

La discussion se divise en trois parties afin de faire la vérification des objectifs et des hypothèses et mettre l'emphase sur quelques observations des résultats obtenus.

3.2.1 Vérification des objectifs

Selon les cartes thématiques résultantes, on est à même de constater que les espèces forestières des sites de reboisement peuvent être identifiées de façon approximative. Les sites de reboisement sont composés d'arbres de la plantation et de la végétation native créant une légère confusion dans l'identification du site de reboisement par rapport à son environnement. Une meilleure définition des périmètres des plantations permettrait de mieux identifier les sites d'entraînement.

L'objectif principal a donc été atteint partiellement. Il faut préciser que les résultats nous démontrent qu'il est possible de différencier les groupes d'arbres du reste de l'image mais sans avoir le périmètre bien défini du site de reboisement.

Pour pouvoir préparer le document cartographique forestier des sites de reboisement il s'agirait de délimiter précisément les plantations. La délimitation des sites de reboisement serait automatique par la méthodologie répétitive de classification et il serait possible de suivre l'évolution des plantations à l'aide de ce document.

Les objectifs spécifiques concernant l'évaluation de la méthode de classification par analyse de texture de l'image ROS de RADARSAT et l'évaluation ainsi que la comparaison de la combinaison des images du visible et du radar ont été atteints. Les tableaux 30, 31 et 32 résument les meilleurs résultats évalués selon les calculs statistiques d'exactitude de classification.

L'objectif spécifique concernant le développement d'une méthodologie répétitive permettant d'effectuer la reconnaissance des espèces forestières reboisées n'a pu être réalisé en raison du manque d'information sur la forme du périmètre des plantations.

3.2.2 Vérification des hypothèses

La première hypothèse émise est possible. Les résultats nous montrent qu'il est possible d'identifier et de cartographier les différentes espèces forestières reboisées de la région de Cochabamba à l'aide de la télédétection. Les deux capteurs TM de Landsat et ROS de RADARSAT donnent de très bons résultats ainsi que la combinaison des deux capteurs.

Les résultats concernant l'identification des sites de reboisement sont très bons. Pour obtenir un document cartographique des différentes espèces forestières reboisées, il s'agirait de connaître la forme du périmètre de chacun des sites pour les reproduire en sites d'entraînement. Les contours des plantations seraient mieux définis.

Selon la littérature, la deuxième hypothèse est possible (Leckie, 1990). C'est-à-dire que la classification à l'aide de la combinaison de canaux de chacune des images (TM et ROS) devrait donner des résultats plus performants que les classifications selon les deux méthodes des images prises individuellement. Dans le cas présent, selon les résultats statistiques, les pourcentages des capteurs pris individuellement ou combinés sont très semblables. On peut donc en conclure que dans notre cas, la combinaison des méthodes des deux capteurs et les méthodes des capteurs pris individuellement sont d'égales performances.

Le développement d'une méthodologie répétitive permettant d'effectuer la reconnaissance des espèces forestières reboisées est probablement toujours valable tel que mentionné à la dernière hypothèse. Malheureusement, les résultats du traitement des données disponibles n'ont pas permis de vérifier l'hypothèse. Par contre, on peut affirmer, selon les résultats obtenus, que la méthode de classification à l'aide des indices de végétation pour une image TM de Landsat et la méthode d'analyse de texture d'une image ROS de RADARSAT sont très appropriées pour élaborer une méthodologie répétitive valable.

3.2.3 Observations

D'une manière générale, l'étude nous a montré que la méthode de classification dirigée par maximum de vraisemblance était la méthode procurant les résultats les plus performants pour la distinction des plantations de reboisement avec le reste du paysage environnant. Cette observation vaut autant pour les classifications de l'image de Landsat que celle de RADARSAT ou du mélange des deux capteurs. Toutefois, les écarts entre les résultats des pourcentages d'exactitude des classes pour les classifications non-dirigées sont plus marqués que pour les classifications dirigées. L'étude nous a montré aussi que les résultats des classifications faites à l'aide des analyses en composantes principales sont un peu plus élevés que les résultats des classifications faites avec les canaux de base.

La distinction des types de couvert végétal réside dans les variations de la proportion des éléments qui les composent. Ainsi, la biomasse végétale est ce qui distingue une forêt d'un champ de culture ou d'un site urbain sur l'image TM. Les figures 11 et 12 montrent l'impact de l'âge des plantations sur la classification des sites de reboisement.



Figure 11 - Plantation avec une classification faible (arrière plan) et plantation avec une classification forte (avant plan)

Sur la figure 11, on trouve deux plantations. La première plantation qui est en arrière plan sur la figure 11 donne un résultat de classification faible. Le site de reboisement comprend la couverture du sol par la végétation naturelle (la classe "autres" des classifications) et les jeunes plants forestiers reboisés. La classe "autres" influence plus sur la différenciation des arbres reboisés avec l'environnement. Par contre, on obtient un très bon résultat de classification sur la deuxième plantations qui est en avant plan sur la figure 11. Cette plantation est plus âgée et l'effet de fermeture des arbres sur le sol fait en sorte que la classe "autres" influence moins sur la différenciation des plants avec son environnement.

La figure 12 donne un exemple d'un résultat moyen d'une classification. La plantation n'est pas uniforme et sa densité est moyenne. Les arbres ne sont pas encore à maturité mais ne sont plus de petits plants. L'âge de la plantation joue donc un rôle important sur la classification car une forêt parvenue à maturité et une forêt encore naissante ne procure pas une densité végétale de même valeur.



Figure 12 - Plantation avec une classification moyenne

Les résultats de classification de l'image TM sont similaires aux résultats de l'image ROS et aux résultats de la combinaison des deux capteurs. L'utilisation des indices de végétation n'affecte ou n'augmente pas de façon significative les résultats de classification. Par contre, quelques

tests nous donnent des résultats avec un grand écart entre les classes. Au tableau 8, par exemple, on remarque que l'indice MSAVI avec les 6 canaux donnent 10 % d'exactitude pour la classe des feuillus et 43 % pour la classe des conifères. L'écart de 33 % entre les deux classes est grand si on considère que pour les autres tests du même tableau le plus grand écart est de 16 %. La même chose dans le tableau 9 où l'écart entre la classe des *Pinus pseudostrobus* et des *Eucalyptus globulus* avec l'indice MSAVI est de 31 % par rapport à 17 % avec l'indice SAVI ou NDVI. L'explication tient peut-être du fait que le MSAVI minimise l'effet du sol nu.

Cette observation dans le développement d'une méthodologie répétitive pour l'identification des sites de reboisement serait un atout. En ayant le périmètre de la plantation et connaissant l'indice de végétation le mieux approprié pour chacun des cas, il serait encore plus facile et précis de faire la classification des plantations. Dans le cas présent, n'ayant pas la délimitation exacte de la plantation, il est difficile de tirer ce genre de conclusion.

La résolution spatiale de l'image ROS est appropriée pour l'identification des sites de reboisement à l'aide de la texture. L'information texturale dépend de la variation spatiale des niveaux de gris de pixels voisins c'est-à-dire, qu'elle dépend de l'échelle d'observation de la scène. L'échelle d'observation pour la reconnaissance d'une classe amène le concept de résolution texturale qui se définit comme la taille minimale requise d'un voisinage de pixels pour que leur arrangement spatial particulier puisse permettre une identification (Roan *and al.*, 1987). Selon la méthodologie utilisée, la résolution texturale est contrôlée par une variable qui est la taille de la fenêtre pour le calcul des paramètres texturaux. Cette fenêtre modifie aussi la création des canaux de texture. Les tableaux 22 et 25 des classifications par espèces nous montrent que chacune des espèces est plus sensible à un type d'arrangement spatial et par conséquent varie selon le paramètre textural se rattachant à cet arrangement.

Par exemple, dans le tableau 22, la texture homogénéité donne un pourcentage de 40 % pour la classe *Eucalyptus globulus* et seulement 28 % pour la classe *Pinus radiata*. Ceci suggère que la texture homogénéité aide à distinguer plus facilement l'*Eucalyptus globulus* que le *Pinus radiata*. La méthode de classification dirigée qui fait référence au tableau 25 semble aider plus à la différenciation des espèces que la méthode non-dirigée. Les statistiques pour l'*Eucalyptus globulus* est de 50 % avec la texture corrélation tandis que les statistiques pour l'espèce *Pinus pseudostrobus* sont seulement de 11 %.

On peut conclure à l'aide du tableau 25, que la texture corrélation est la plus appropriée pour l'*Eucalyptus globulus*. Les textures entropie et second moment angulaire sont les plus

appropriées pour le le *Pinus radiata* et la texture entropie est la meilleure pour le *Pinus pseudostrobus* selon notre choix initial.

On remarque que la combinaison des données spectrales et texturales n'est pas une simple addition donnant un résultat statistique plus élevé. Les résultats pris sur les images individuellement et en combinaison sont dans le même ordre de grandeur. Cependant, la combinaison 2 (6 canaux + NDVI (ACP1 + ACP2) et Image ROS + HOMO (homogénéité)) donne des résultats plus élevés que l'image TM et l'image ROS prises individuellement selon les mêmes tests.

Deux suggestions s'imposent pour un projet futur. Premièrement, l'utilisation d'images du capteur SPOT où la résolution spatiale est de 10 m en mode panchromatique et de 20 m en mode multibande. En ayant une meilleure résolution spatiale, les résultats de la combinaison avec les bandes texturales de RADARSAT devraient donner de meilleurs résultats. Deuxièmement, RADARSAT est une source d'information. Ces informations peuvent être recueillies sous différents modes et angles d'observation. L'étude sur le choix optimum de l'angle d'incidence et sur le choix de la bande peuvent donner lieux à d'autres projets de recherche.

Une autre observation sur la combinaison des images des deux capteurs est que la combinaison procure des résultats statistiques avec de plus petits écarts entre les différentes espèces.

Il découle de l'ensemble de ces constatations que la méthodologie répétitive peut être élaborée soit par des données de Landsat ou soit par des données de RADARSAT. Étant donné que les résultats ne présentent pas de grands écarts en combinant les deux images par rapport à leur utilisation individuelle, il faut peut-être faire un choix sur l'un ou l'autre des capteurs qui sont d'égales performances pour la situation spécifique.

Il est bon de souligner que l'utilisation de données satellitaires pour faire le suivi des plantations est peu coûteux que ce soit du satellite Landsat ou RADARSAT. Les données manquantes dans la base de données qui sont nécessaires au développement de la méthodologie répétitive peuvent être prises lors de la plantation des arbres. Ceci éviterait le transport des travailleurs sur le site plusieurs fois. Ce qui implique une seule visite sur chacune des plantations pour ensuite faire le suivi entier d'un seul endroit peu importe la saison.

Que ce soit la méthode à l'aide des indices de végétation ou la méthode à l'aide des indices de texture, elles sont très prometteuses. Le travail de la méthodologie répétitive afin d'élaborer une carte forestière des sites de reboisement pourrait être élargie et permettre la cartographie des champs de cultures ou de l'utilisation du sol.

4. Conclusions

À la lumière des résultats obtenus, nous constatons que le développement d'une méthodologie répétitive pour le suivi des sites de reboisement de la région de Cochabamba et l'élaboration d'une carte forestière sont des objectifs toujours possibles. L'idée d'utiliser la télédétection pour développer cette méthodologie est très prometteuse. Dans une région montagneuse, difficile d'accès et déficiente de données cartographiques actualisées, les images de Landsat et de RADARSAT constituent d'importants outils de travail afin d'améliorer, de compléter et de mettre à jour facilement les données sur les plantations.

L'idée d'une analyse multodate des images permettrait de faire le suivi des plantations à l'aide de la télédétection. Cette analyse donnerait des informations sur le taux de croissance des arbres et sur la santé des plantations selon leur vieillissement sans avoir à se déplacer.

Dans le cas présent, il n'existe pas une grande complémentarité dans la combinaison des images des deux capteurs. La raison vient peut-être du fait de la différence trop grande entre les deux résolutions spatiales. C'est pourquoi nous suggérons de faire une étude sur la combinaison d'une image multispectrale de SPOT (Satellite pour l'observation de la Terre) et d'une image de RADARSAT.

Les différentes méthodes de classification ont permis de constater que la méthode de classification dirigée par maximum de vraisemblance serait un bon choix pour l'élaboration de la méthodologie répétitive. Les méthodes de classification à l'aide des indices de végétation donnent de meilleurs résultats avec une analyse en composantes principales. La méthode par analyse de textures est aussi performante selon les résultats statistiques que la méthode utilisant les données spectrales.

Toutefois, si la base de données pouvait fournir la forme du périmètre de chacun des sites de reboisement, la confusion du site de reboisement avec son proche environnement serait évitée et la cartographie forestière pourrait se faire en élaborant la méthodologie répétitive

5. Références




- Anys, H. et He, D.-C. (1995) Approche multipolarisation et texturale pour la reconnaissance des cultures à l'aide de données radar aéroporté. *Journal canadien de télédétection*, vol. 21, n° 2, p. 138-157.
- Anys, H. (1995) Reconnaissance des cultures à l'aide des images radar: Approche multipolarisation et texturale. Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 241 p.
- Bannari, A., Huete, A.R., Morin, D. and Zagolski, F. (1995a) Effets de la couleur et de la brillance du sol sur les indices de végétation. 17th Canadian Symposium on Remote Sensing, Saskatoon, Saskatchewan, Canada.
- Bannari, A., Morin, D. and Bonn, F. (1995b) A review of vegetation indices. *Remote Sensing Reviews*, vol. 13, p.95-120.
- Bannari, A. (1996) La télédétection et les indices de végétation pour la détection de la végétation éparsée et moyennement dense: cas de l'environnement urbain. Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, 230 p.
- Bonn, F. et Rochon, G. (1992) Précis de télédétection, volume 1: Principes et méthodes. Presses de l'Université du Québec, AUPELF, Québec, 485 p.
- Centre canadien de télédétection (1998) www.cct.rncan.gc.ca
- Guyot, Gérard (1989) Signatures spectrales des surfaces naturelles: télédétection satellitaire 5. Paradigme, France, 178 p.
- Huete, A.R. (1988) A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, vol. 25, p.295-309.
- Huete, A.R., Liu, H.Q., Batchily, K. and van Leeuwen, W. (1997) A comparison of vegetation indices over a global set of TM images for EOS-MODIS. *Remote Sensing Environment*, n° 59, p. 440-451.
- Holmes, M.G. and Woodward, F.I. (1994) Global monitoring of forests with radar. *Advances in Bioclimatology*, vol. 3, p. 125-149.
- Hutchinson, C.F. (1982) Techniques for combining Landsat and ancillary data for digital classification improvement. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 48, n° 1, p. 123-130.
- Kaufman, Y.J. and Tanré, D. (1992) Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 30, n° 2, p. 261-270.

- Lanciault, P., Royer, A. et Anseau, C. (1994) Relations entre la réflectance spectrale satellitaire et des paramètres de peuplements forestiers de la forêt boréale québécoise. *Journal canadien de télédétection*, vol. 20, n° 2, p. 116-122.
- Landsat program (1997) www.geo.arc.nasa.gov/sge/landsat/landsat.html
- Leckie, D.G. (1990) Synergism of synthetic aperture radar and visible/infrared data for forest type discrimination. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, vol. 56, n° 9, p. 1237-1246.
- Markham, B.L. and Barker, J.L. (1986) Landsat MSS and TM post-calibration dynamic ranges, exoatmospheric reflectances and at-satellite temperatures. EOSAT, Landsat Technical Notes, NASA / Goddard Space Flight Centre Greenbelt, MD 20771, USA.
- RADARSAT International (1996) Information solutions RADARSAT. RADARSAT International, Client Services, Canada.
- Richards, J.A. (1986) Remote sensing digital image analysis, an introduction. Springer-Verlag, New York, 274 p.
- Roan, S.J., Aggarwal, J.K. and Martin, W.N. (1987) Multiple resolution imagery and texture analysis. *Pattern Recognition*, vol. 20, n° 1, p. 17-31.
- Schowengerdt, R.A. (1983) Techniques for image processing and classification in remote sensing. Academic Press, New York, 249 p.
- Thompson, M.D., Macdonald, B.C. and Jefferies, W.C. (1993) Progress in forest mapping using airborne radar in tropical regions. *ITC Journal*, n° 4, p. 347-354.

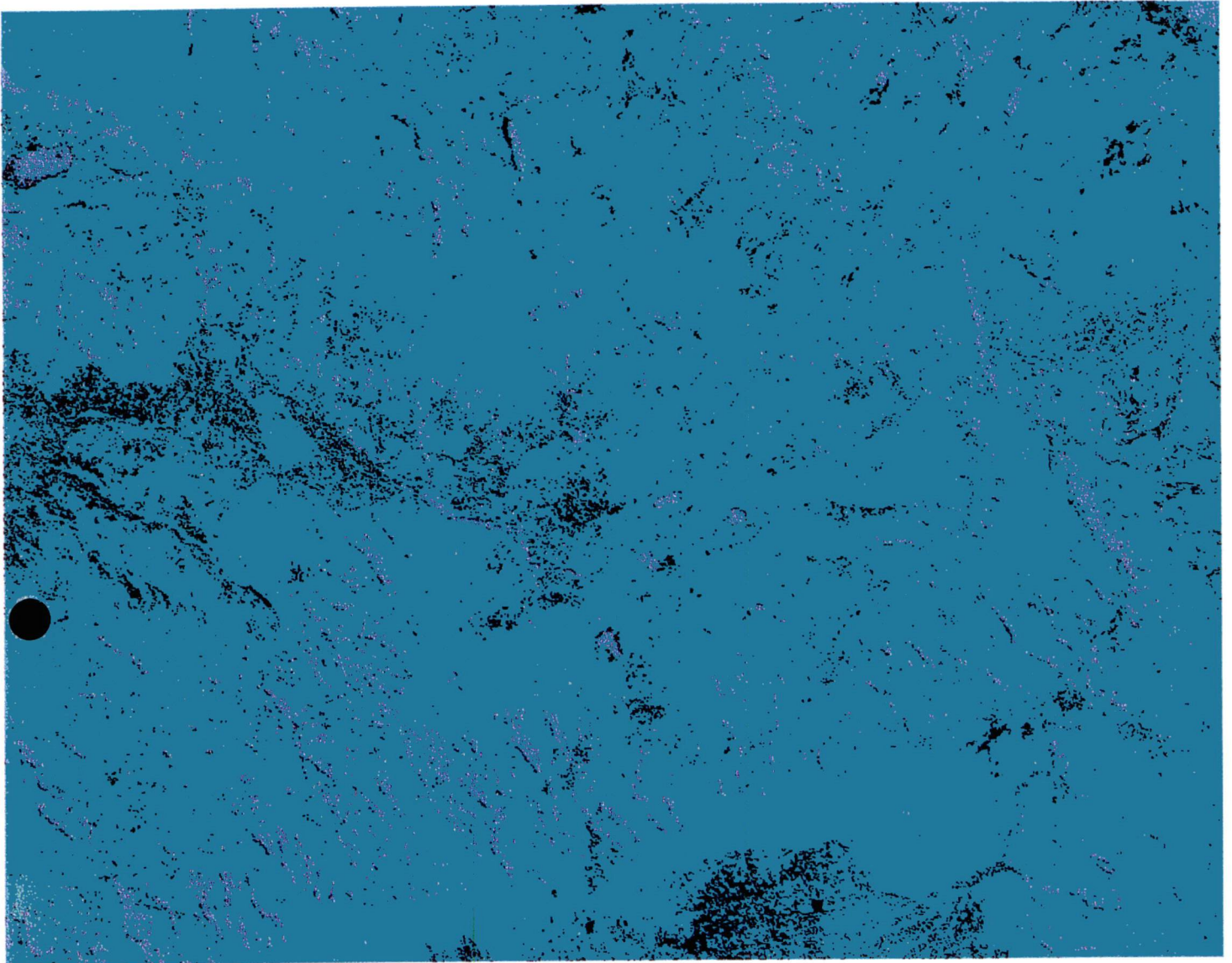
Annexe 1 - Images résultantes des meilleurs tests de classification

Les neuf images résultantes des tableaux récapitulatifs 30, 31 et 32 suivent avec un site d'entraînement de chacune des trois espèces.

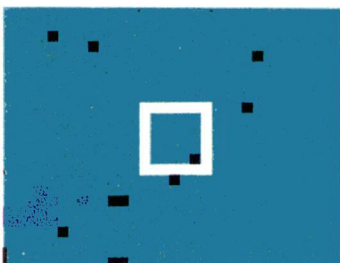
La légende des couleurs est expliquée:

	: Eau	: regroupant les lacs et cours d'eau
	: Pixels non-classés	
	: Autres	: regroupant les infrastructures (5 %), les sols nus (2 %) et la végétation naturelle (93 %)

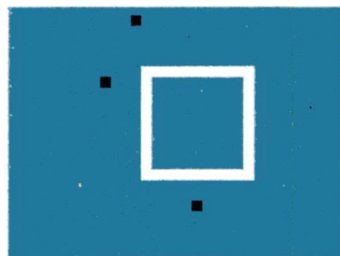
Classification dirigée ACP (TM1, TM2, TM3, TM4, TM5, TM7) pour distinguer la végétation sur l'image TM de Landsat.



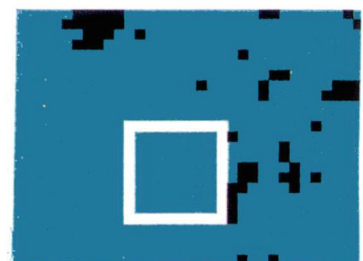
Eucalyptus globulus
(vert)



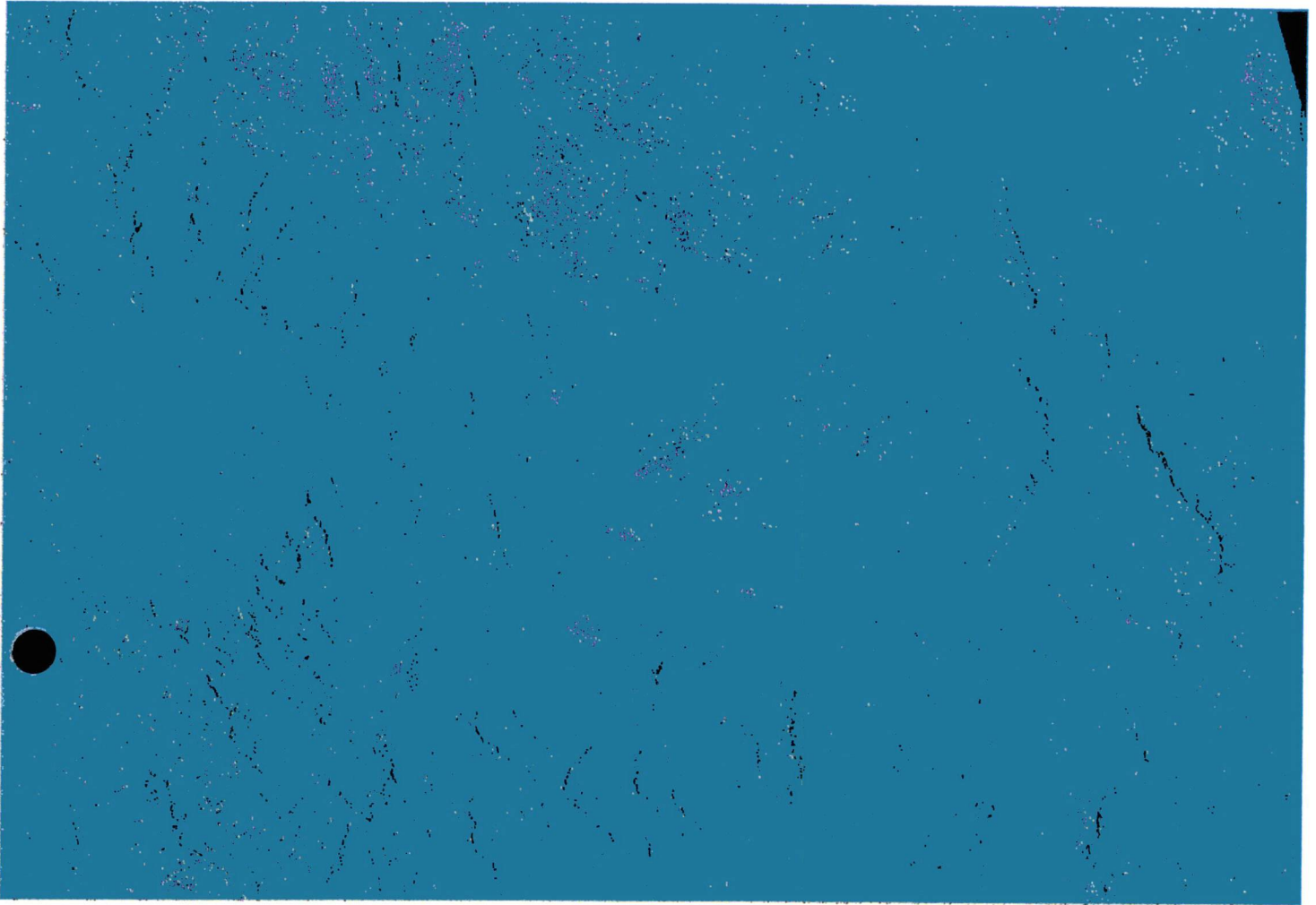
Pinus radiata
(vert)



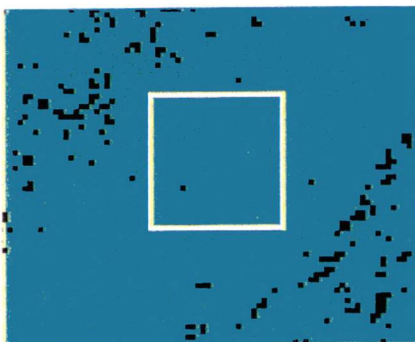
Pinus pseudostrobus
(vert)



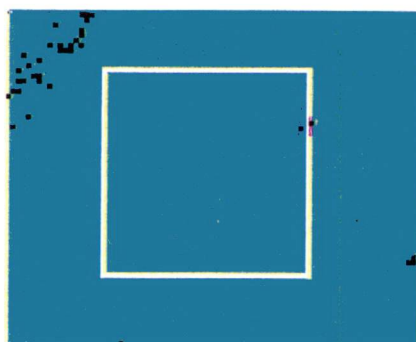
Classification dirigée (Image, homogénéité) pour distinguer la végétation sur l'image ROS de RADARSAT.



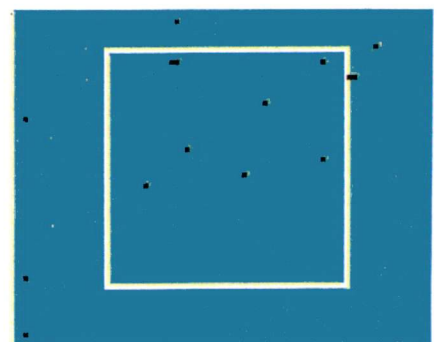
Eucalyptus globulus
(vert)



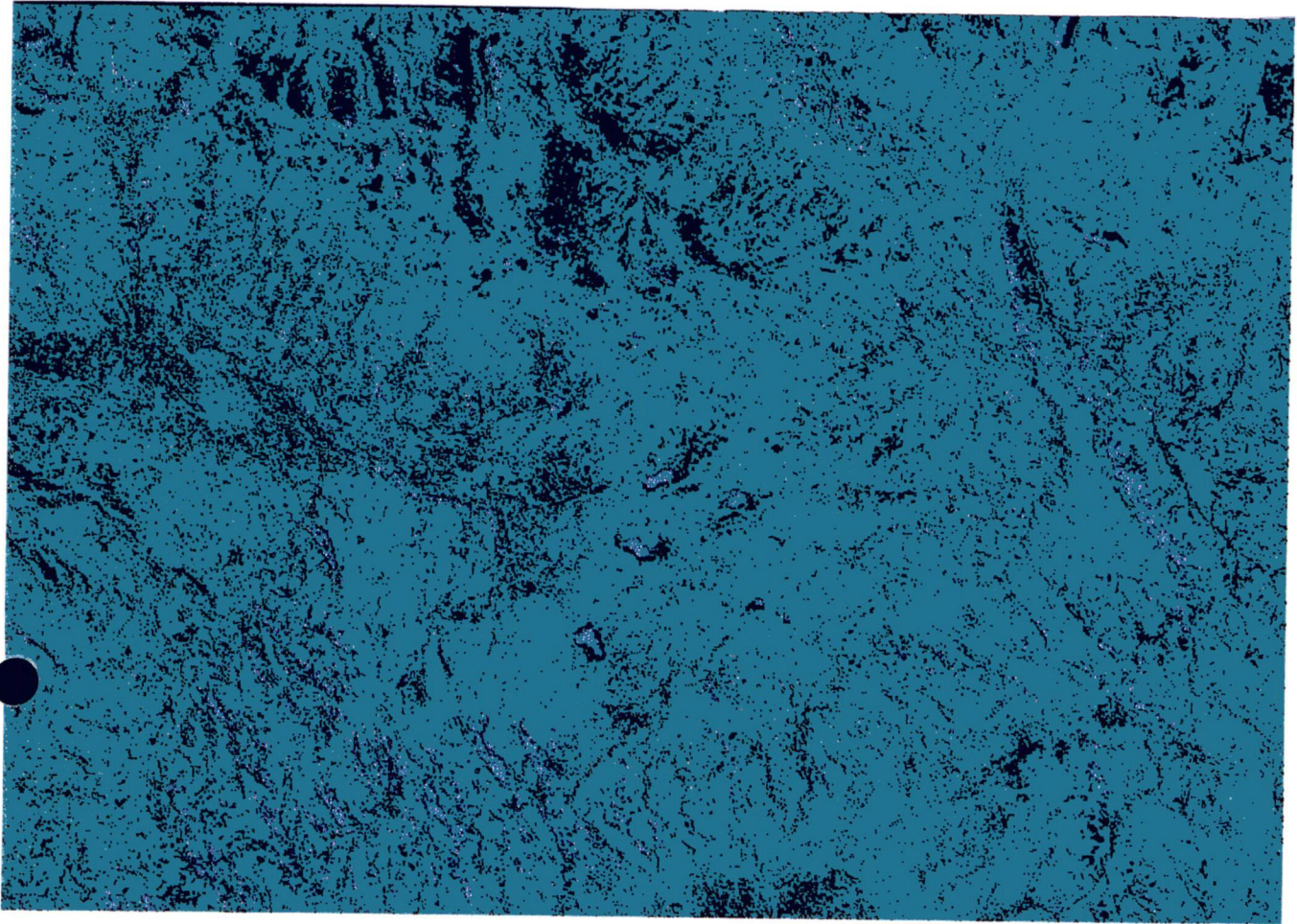
Pinus radiata
(vert)



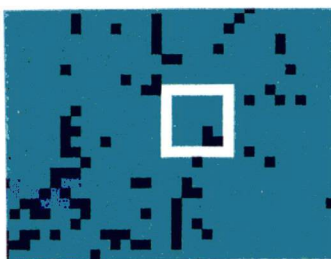
Pinus pseudostrobus
(vert)



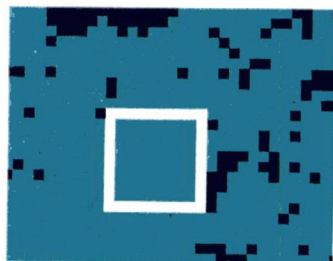
Classification dirigée de l'image TM de Landsat (6 canaux (ACP1 + ACP2)) et de l'image ROS de RADARSAT (Image, homogénéité) pour distinguer la végétation.



Eucalyptus globulus
(vert)



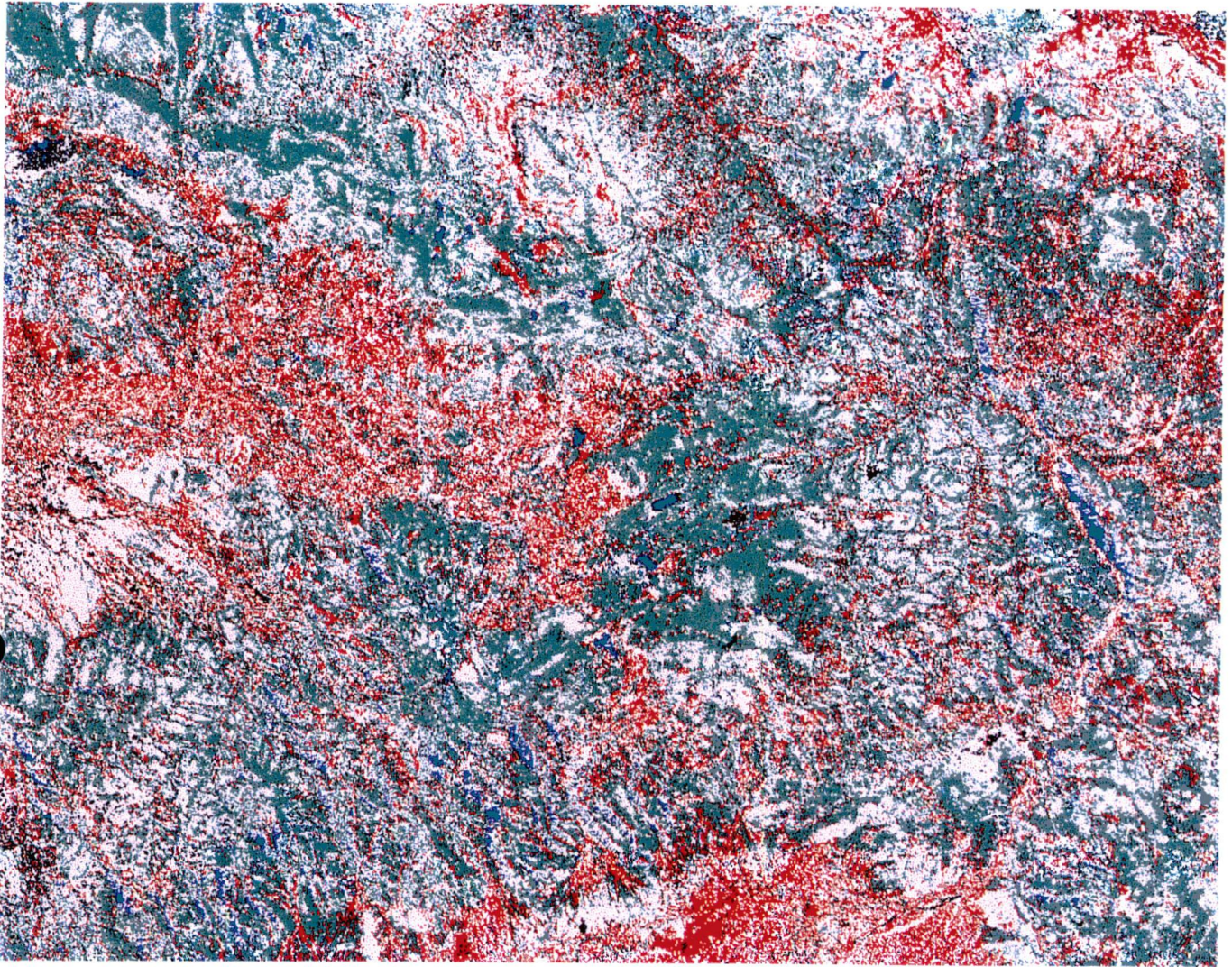
Pinus radiata
(vert)



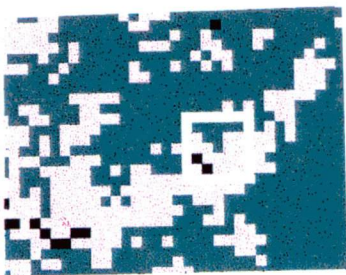
Pinus pseudostrobus
(vert)



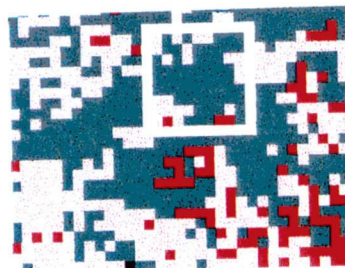
Classification non-dirigée ACP (TM1, TM2, TM3, TM4, TM5, TM7, NDVI)
pour distinguer les feuillus et les conifères sur l'image TM de Landsat.



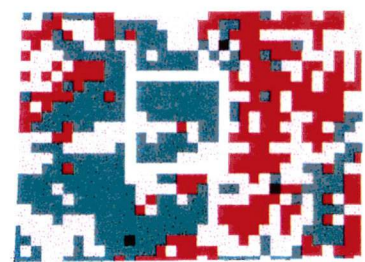
Eucalyptus globulus
(vert)



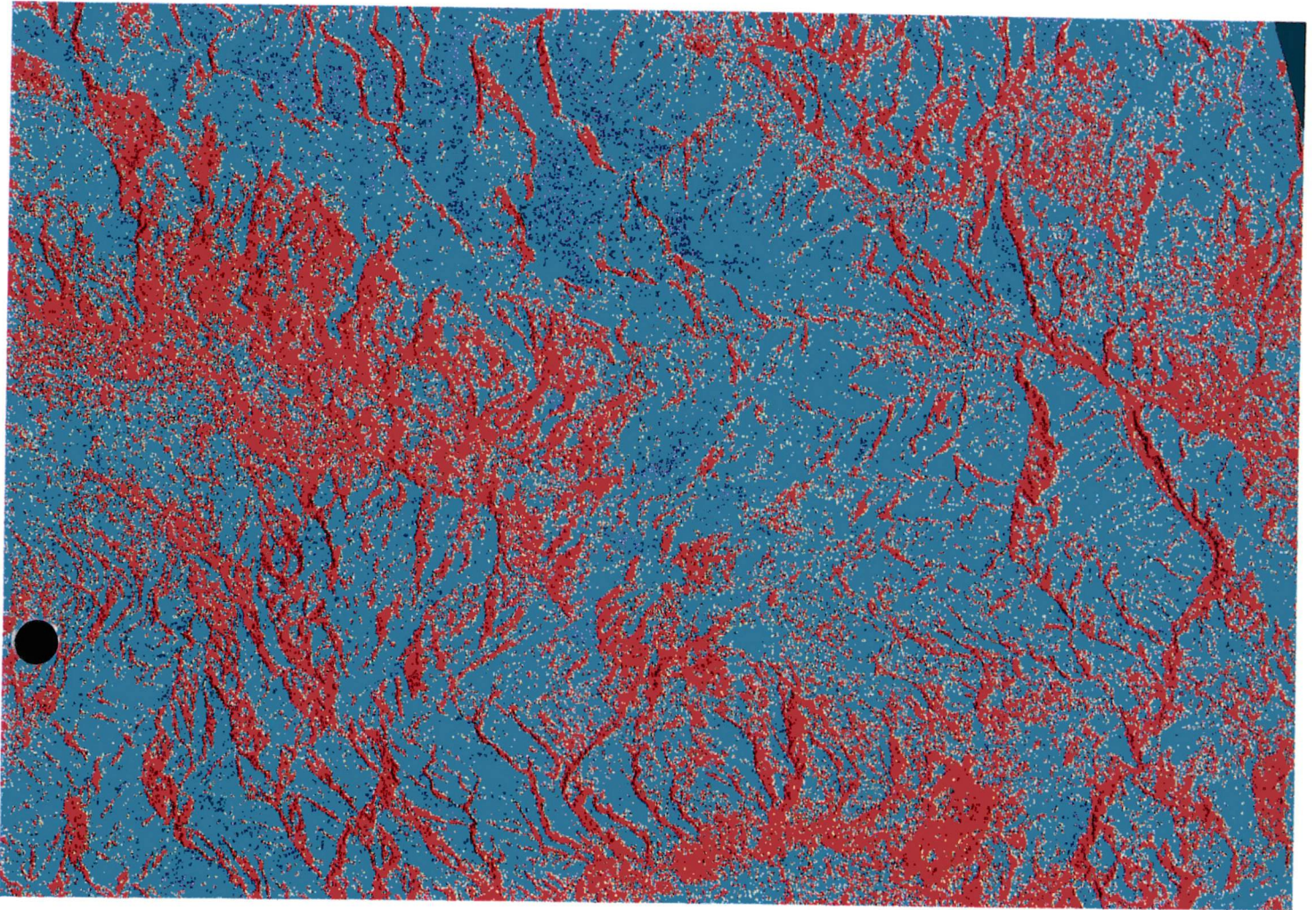
Pinus radiata
(rouge)



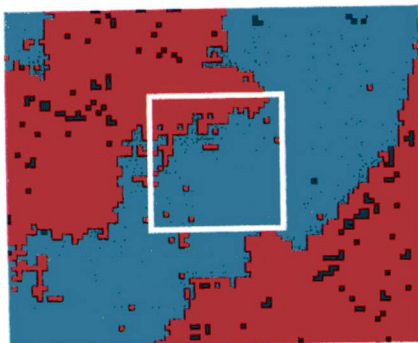
Pinus pseudostrobus
(rouge)



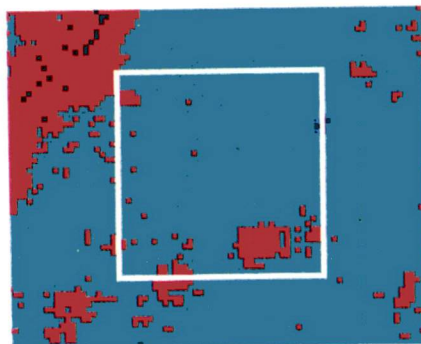
Classification dirigée (Image, homogénéité) pour distinguer les feuillus et les conifères sur l'image ROS de RADARSAT.



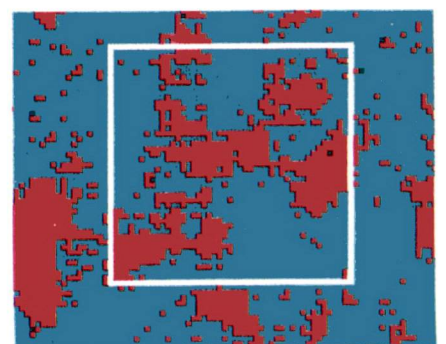
Eucalyptus globulus
(vert)



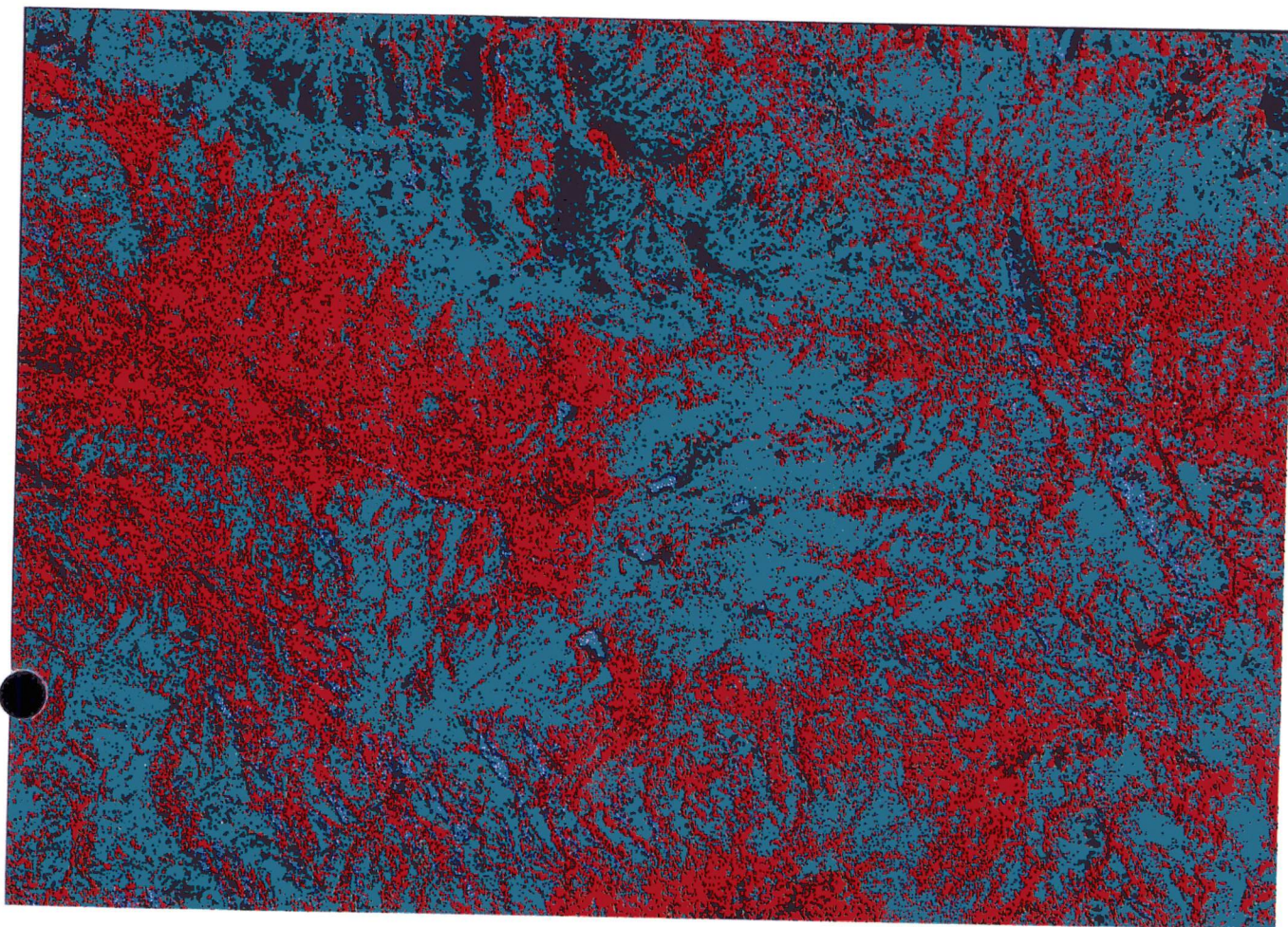
Pinus radiata
(rouge)



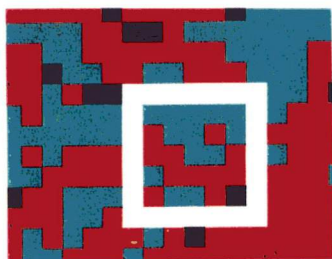
Pinus pseudostrobus
(rouge)



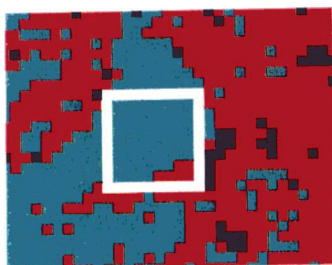
Classification dirigée de l'image TM de Landsat (6 canaux (ACP1 + ACP2)) et de l'image ROS de RADARSAT (Image, homogénéité) pour distinguer les feuillus et les conifères.



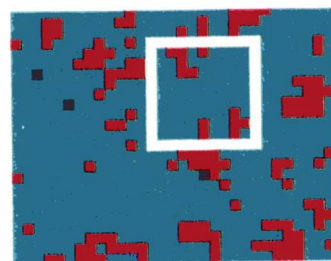
Eucalyptus globulus
(vert)



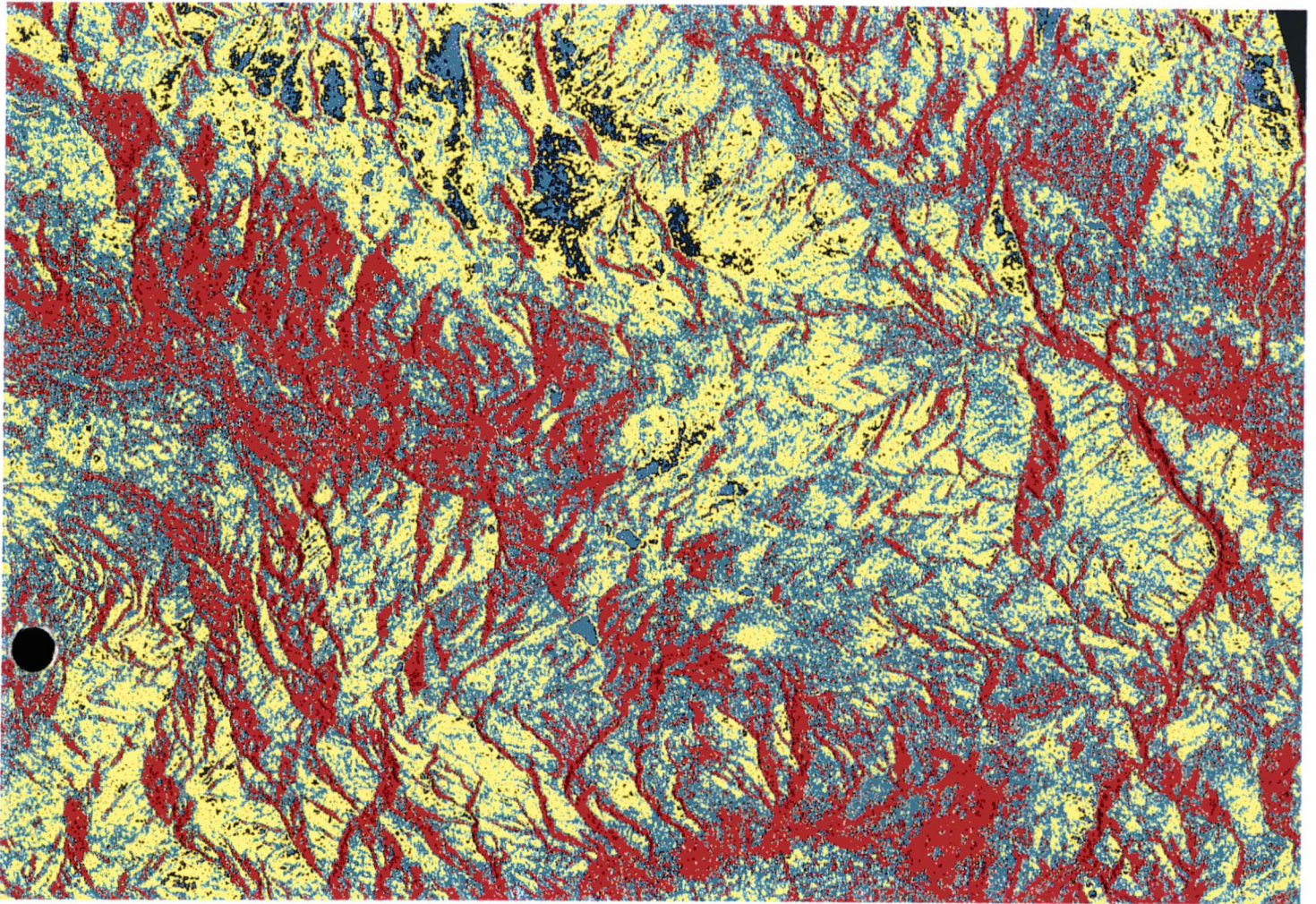
Pinus radiata
(rouge)



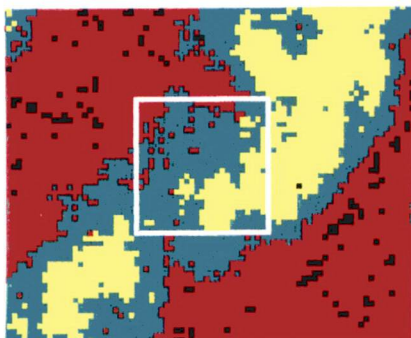
Pinus pseudostrobus
(rouge)



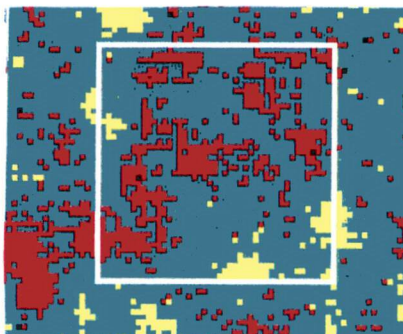
Classification dirigée (Image, entropie) pour distinguer les espèces d'arbres sur
l'image ROS de RADARSAT.



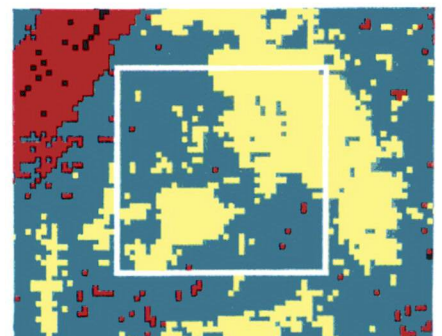
Eucalyptus globulus
(vert)



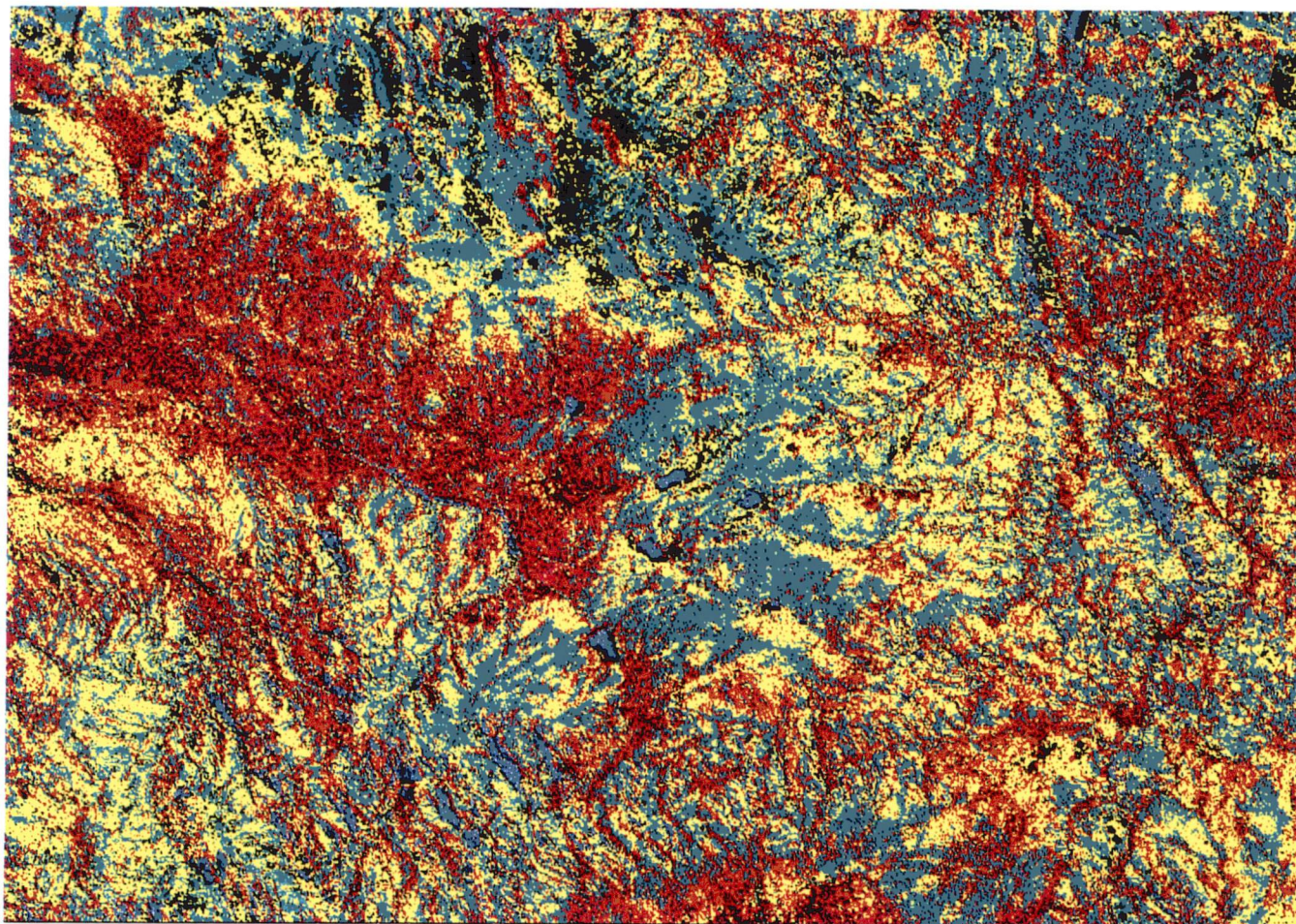
Pinus radiata
(rouge)



Pinus pseudostrobus
(jaune)



Classification dirigée de l'image TM de Landsat (6 canaux (ACP1 + ACP2)) et de
l'image ROS de RADARSAT (Image, homogénéité)
pour distinguer les espèces d'arbres.



Eucalyptus globulus
(vert)

Pinus radiata
(rouge)

Pinus pseudostrobus
(jaune)

